

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Akumulace energie z obnovitelných zdrojů

Accumulating energy from renewable sources

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Petr Kejík**

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Akumulace energie z obnovitelných zdrojů  
Accumulating energie from rewenable sources

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Fotovoltaické elektrárny
2. Stochastika získané energie ze slunce
3. Vodíková technologie
4. Akumulace elektrické energie do vodíku využitím elektrolyzéru

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Hradílek, Z.: Elektroenergetika průmyslových a distribučních zařízení.  
VŠB - TU Ostrava, 2008. ISBN 978-80-7225-291-6.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

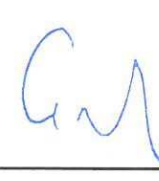
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Zdeněk Hradílek, DrSc.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Veškeré použité podklady, ze kterých jsem čerpal informace, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

## **Poděkování**

Děkuji panu Prof. Ing. Zdeňku Hradílkovi, DrSc. za pomoc s výběrem odborné literatury a velmi cenné a věcné rady při našich pravidelných konzultacích. Mé velké díky patří také panu Ing. Petru Moldříkovi, Ph.D. za odborné vedení praktickou částí této práce. Děkuji své rodině, za podporu při studiu.

.....  
Místo a datum

.....  
Jméno a příjmení studenta

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá akumulací elektrické energie do vodíku pomocí elektrolyzéru, který je napájen z fotovoltaických (FV) panelů, jako zdroje elektrické energie. Práce obsahuje teoretický rozbor základních akumulačních systémů, doplněné o jejich jednotlivé výhody a nevýhody. Vybrané typy akumulačních systémů jsou následně hodnoceny pomocí multikriteriální analýzy, metodou minimalizace vzdálenosti od ideální varianty (TOPSIS). Praktická část pojednává o maximalizaci využití elektrické energie získané prostřednictvím FV panelů a její uložení ve formě vodíku do tlakových lahví.

## **Klíčová slova**

Akumulace, vodík, fotovoltaika, obnovitelné zdroje energie, elektrolyzér

## **Abstract**

This diploma thesis deals with the accumulation of electrical energy into hydrogen using an electrolytic cell, which is powered by photovoltaic panels (PV) as a source of renewable energy. Thesis contains a theoretical analysis of the basic storage systems, which shows their individual advantages and disadvantages. Selected types of storage systems are analyzed using multi-criteria analysis method to minimize the distance from the ideal variant (TOPSIS). The practical part focuses on maximizing the utilization of electrical energy generated by the PV panels and its storage in the form of hydrogen in the cylinders.

## **Key words**

Accumulation, hydrogen, photovoltaics, renewable energy sources, electrolyzer

## Seznam použitých zkratk:

PVE	Přečerpávací vodní elektrárna
CAES	Compressed Air Energy Storage (Systém stlačeného vzduchu)
AACAES	Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage (supravodivý indukční akumulátor)
DOD	Deep of discharge (hloubka vybíjení)
Ni-Cd	Nikl-kadmiové akumulátory
Li-Ion	Lithium Iontové akumulátory
Nas	Akumulátor Sodium – Sulfur
OZE	Obnovitelný zdroj energie
ES	Elektrizační soustava
PEM	Proton exchange membrane (polymerní iontoměničová membrána)
TOPSIS	The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (metoda minimalizace vzdálenosti od ideální varianty)
MCA	Multi-criteria analysis (multikriteriální analýza)
U	Napětí (V)
Wh/kg	Watthodina na kilogram
kg	Kilogram
DC	Stejnoseměrné
AC	Střídavé
např.	Například
m	Hmotnost (kg)
cca	přibližně
l	litr
m <sup>3</sup>	metr krychlový
FV	Fotovoltaika

## Poznámka:

Ostatní symboly a zkratky se vyskytují v textu pouze s jejich okamžitým vysvětlením.

## Obsah

1. Úvod.....	3
2. Rozbor variant akumulčních systémů.....	4
2.1. Mechanická akumulace.....	4
2.1.1. Přecherpávací vodní elektrárny (PVE).....	4
2.1.2. CAES - Compressed Air Energy Storage.....	5
2.1.3. Setrvačník.....	6
2.2. Elektrická akumulace.....	7
2.2.1. Supravodivé indukční akumulátory.....	7
2.2.2. Superkondenzátory.....	8
2.3. Elektrochemická akumulace.....	9
2.3.1. Olověné akumulátory.....	9
2.3.2. Průtokové baterie.....	10
2.3.3. Alkalické akumulátory.....	11
2.4. Chemická akumulace – Akumulace do vodíku – Palivové články.....	14
2.4.1. Vodíkový akumulční systém.....	14
2.4.2. Elektrolyzér PEM.....	15
2.4.3. Palivový článek.....	16
3. Rozpracování akumulace pomocí multikriteriální analýzy TOPSIS.....	17
3.1. Teorie MCA TOPSIS.....	17
3.2. Volba variant a návrh kritérií pro MCA TOPSIS.....	18
3.3. Volba metody určování vah kritérií.....	19
3.3.1. Teorie metody kvantitativního párového srovnání kritérií.....	19
3.3.2. Aplikace metody kvantitativního párového srovnání kritérií.....	21
3.4. Rozbor výsledných vah pro jednotlivá kritéria.....	22
3.4.1. Pořizovací náklady.....	22
3.4.2. Životnost.....	22
3.4.3. Účinnost.....	22
3.4.4. Měrná kapacita.....	23
3.4.5. Doba odezvy.....	23
3.5. Aplikace a zhodnocení MCA TOPSIS.....	23

3.5.1.	Výpočet optimální varianty pomocí MCA TOPSIS	23
3.6.	Zhodnocení výsledků MCA TOPSIS	24
4.	Akumulace elektrické energie do vodíku pomocí elektrolyzáru	25
4.1.	Popis laboratoře palivových článků	25
4.1.1.	Polykrystalické FV panely	26
4.1.2.	Olověné baterie Fiamm 12 FLB 300	26
4.1.3.	Polovodičové měniče	27
4.1.4.	Elektrolyzáru	27
4.1.5.	Průtokoměr	28
4.1.6.	Tlakové láhve	28
4.2.	Rozbor dat, naměřených na FV panelech	29
4.2.1.	Slunečně podprůměrné dny	29
4.2.2.	Slunečně nadprůměrné dny	31
4.3.	Rozbor dat, naměřených na elektrolyzáru	33
4.3.1.	Průběh měření	33
4.3.2.	Výsledky měření	34
4.4.	Rozbor dat naměřených na FV panelech a elektrolyzáru	37
4.4.1.	Teoretický úvod	37
4.4.2.	Základní principy pro rozbor	37
4.4.3.	Metodika akumulace	37
4.4.4.	Teoretické výsledky akumulace el. energie do vodíku	38
4.4.5.	Návrh na zlepšení účinnosti systému	42
5.	Zhodnocení	43
6.	Závěr	44

## 1. Úvod

S rostoucí výrobou elektrické energie z obnovitelných zdrojů (OZ) vyvstává problém, co s touto energií, kterou máme k dispozici, ať už prostřednictvím slunečního záření z fotovoltaických elektráren, nebo z elektráren větrných. Rozmach OZ elektrické energie se neustále stupňuje, a jelikož je jejich výstupní výkon závislý na počasí, nelze jej vyjma odstavení elektrárny regulovat, ale jen s určitou přesností predikovat.

Aby se instalovaná technologie na výrobu elektrické energie z OZ maximálně zužitkovala, je nutno do elektrizační soustavy (ES) zabudovat akumulární prvek, který je schopen akumulovat přebytky elektrické energie z OZ a uchovat je pro pozdější využití, kdy výkon OZ bude nedostačující nebo nulový.

V této práci se nachází rozbor různých akumulárních systémů, které se v současné době využívají, ať už průmyslově, nebo jen experimentálně. Vybrané typy akumulárních systémů jsou porovnány pomocí multikriteriální analýzy s přihlédnutím ke konkrétnímu využití akumulárního systému v decentralizované soustavě o výkonu v řádech několika desítek kW.

Praktická část práce je zaměřena na efektivní akumulaci energie získané ze slunečního záření prostřednictvím FV panelů za pomoci elektrolyzéru ve formě vodíku to tlakových lahví. Cílem praktické části bylo zjistit efektivitu systémů laboratoře a nastínění jejich možných vylepšení.



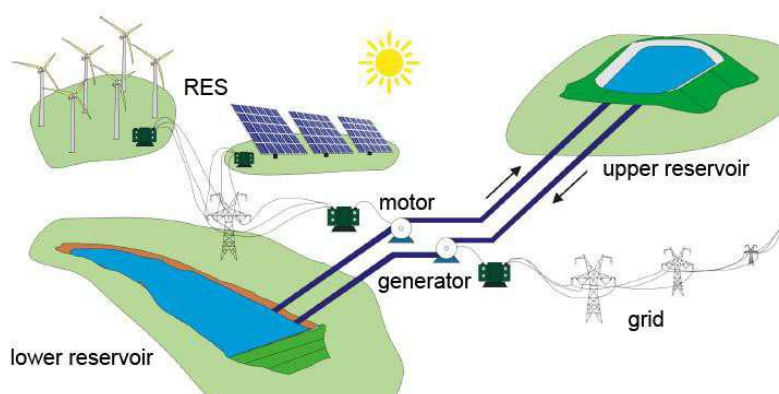
## 2. Rozbor variant akumulčních systémů

### 2.1. Mechanická akumulace

#### 2.1.1. Přecherřávací vodní elektrárny (PVE)

Přecherřávací vodní elektrárny (PVE) jsou klasickým zdrojem elektrické energie, který je schopný energii akumulovat. Jejich hlavní částí jsou dvě vodní nádrže, spojovací potrubí a strojovna. Princip akumulace spočívá v tom, že v době nízkého zatížení sítě se čerpá voda ze spodní do horní nádrže, turbína s generátorem tedy pracuje jako čerpadlo a motor. V době vysokého zatížení sítě se horní nádrž přes turbínu vypouští do spodní nádrže a generátor poháněný turbínou dodává do sítě elektrickou energii. [3]

Tento typ vodních elektráren klade vysoké nároky na geografické podmínky, jelikož je potřeba velké plochy pro obě nádrže a velký výškový rozdíl mezi nádržemi.[10]



Obrázek 1 – Přecherřávací vodní elektrárna [3]

#### Výhody:

- Velmi vysoká akumulční kapacita (1800MW, Inorwic, Wales, UK)
- Nízké provozní náklady [4]

#### Nevýhody:

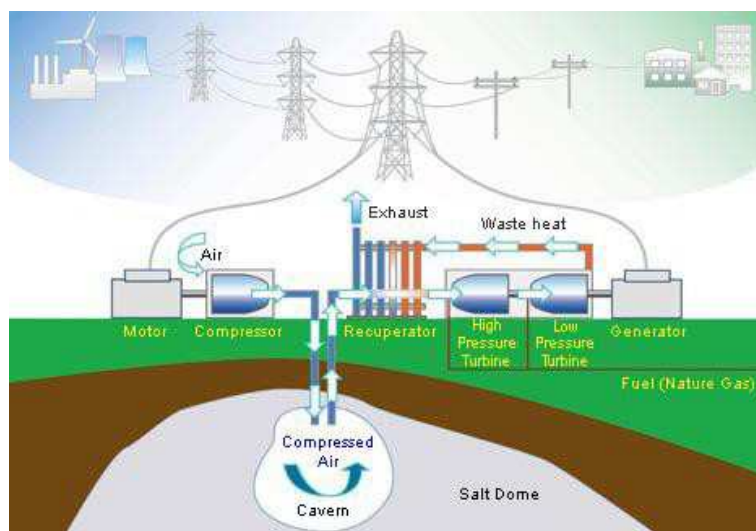
- Nutnost najít vhodné místo pro výstavbu
- Ekonomicky náročná výstavba (30 000,- CZK/kW)
- Relativně pomalý náběh na jmenovitý výkon v řádu desítek sekund [2] [4]

### 2.1.2. CAES - Compressed Air Energy Storage

Systém využívá energii stlačeného vzduchu, který se kompresorem vhání do podzemní nádrže (jeskyně, důl...) a pak slouží společně se zemním plynem pro pohon plynové turbíny. Odpadní teplo turbíny se využívá pro předehřívání stlačeného vzduchu a tím zvýšení účinnosti systému. [3]

Z důvodů problémů, jako je adiabatická komprese, systémy CAES nejsou příliš rozšířeny a úspěšně začleňovány do místních podmínek. Účinnost systému je mezi 60 – 75 %. Nicméně ve světě již běží několik úspěšných projektů, které využívají opuštěné solné doly, vytěžená ložiska ropy a podobně. Výhoda těchto hlubinných dolů je ta, že vlivem tlaku nedochází k rozrušování stěn kaverny. [10]

V poslední době se začíná mluvit o zlepšení dosavadního systému, který je nazván AACAES. Pracuje na stejném principu jako CAES, ale zde se využívá teplo, které je odebíráno při stlačování vzduchu a následně skladováno. Následně při opouštění vzduchu z taverny by se využil uložený teplý vzduch ze stlačování a tím by se zvýšila účinnost na 70%. [4]



Obrázek 2 - Princip systému CAES [3]

#### Výhody:

- Akumulační kapacita (50-300 MW)
- Rychlý náběh plynové turbíny oproti klasické spalovací turbíně (9-12 min oproti 20-30 min)

#### Nevýhody:

- Nutnost najít vhodné místo pro výstavbu (velké podzemní prostory) [4]

### 2.1.3. Setrvačník

Setrvačník je nejstarší koncepce na ukládání mechanické energie. Dnes se například využívá při vyrovnávání chodů u všech spalovacích motorů či jiných strojů.

Setrvačník funguje na principu uchování kinetické energie. Kinetickou energii získáme pomocí elektrického příkonu, kterým se roztáčí rotor. V tuto chvíli se chová jako „motor“. Při potřebě energie se motor přemění na generátor a je vytvářena energie.

Moderní setrvačníky jsou vyrobeny z uhlíkových kompozitů, které jsou lehké, a rotor s nimi dosáhne větší rychlosti. Pro dosažení velkých rychlostí je důležité samotné uložení rotoru. Rotor je uložen ve vakuu, často v magnetických ložiskách, aby se snížil odpor vzduchu a samotné tření na ložiskách. Setrvačníky se dodávají do průmyslu, kde i několikavteřinový výpadek elektřiny může způsobit škody na řídicích a počítačových systémech ve výrobě. [4] Maximální otáčky dosahují 60 000 min<sup>-1</sup>, výkon může dosahovat až 1 MW a doba dodávky energie od 30 s do 15 min. [3]



Obrázek 3 - Setrvačník firmy Beacon Power [3]

#### Výhody:

- Účinnost (přes 80%)
- Oproti bateriím větší měrný výkon

#### Nevýhody:

- Vysoká cena (oproti bateriím)
- Bezpečnostní rizika kvůli velmi vysokým otáčkám [4]

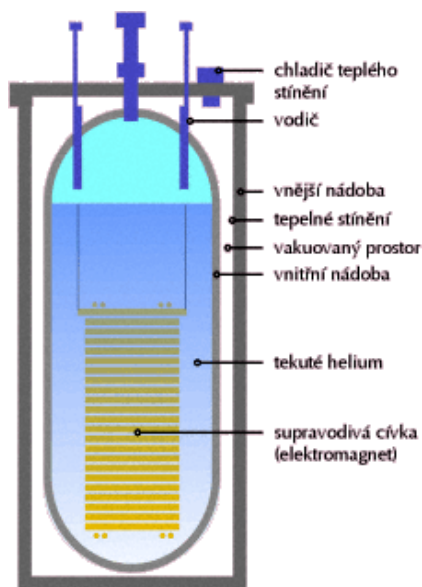
## 2.2. Elektrická akumulace

### 2.2.1. Supravodivé indukční akumulátory

Energie se zde uchovává v podobě magnetického pole vytvářeného supravodivou cívkou umístěnou v kryogenním prostředí. V tomto systému sice nevznikají ohmické ztráty přímo v cívce, jako ztráty však lze považovat energii spotřebovanou chladicím systémem. [3]

Zatím bylo realizováno několik menších supravodivých akumulátorů, určených k překonání krátkodobých výpadků proudu v závodech na výrobu polovodičů, čipů a filmů, kde i výpadek pouhé desetiny sekundy může způsobit velké škody a ochromit výrobu.

Větší supravodivý akumulátor SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) o kapacitě 800 Wh stabilizuje spojovací vedení společnosti Bonneville Power v Oregonu (USA). Obstál při několika milionech cyklů nabití-vybití. Doba nabíjení i vybíjení je extrémně krátká a účinnost lepší než 95 %. [4]



Obrázek 4 - Supravodivý akumulátor [14]

#### Výhody:

- Vysoká účinnost (až 95%)
- Extrémně krátká doba náběhu (0,2  $\mu$ s)

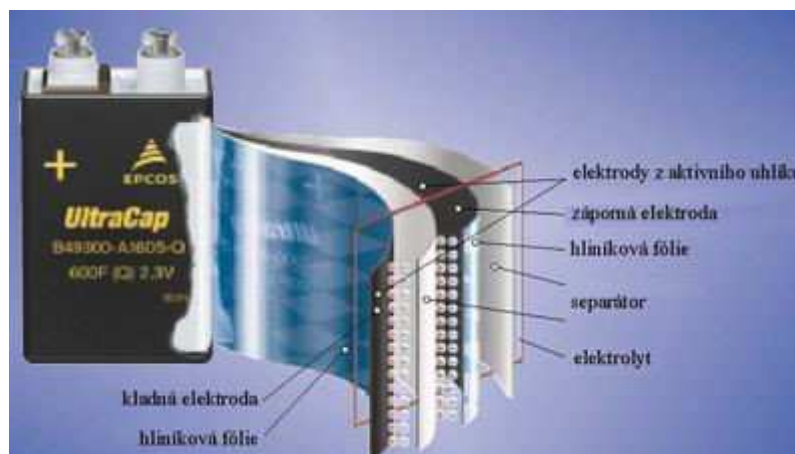
#### Nevýhody:

- Nutnost chlazení (dusík, vodík, helium)
- Technologická a tím i ekonomická náročnost [4]

### 2.2.2. Superkondenzátory

Superkondenzátor je perspektivním akumulátorem energie, schopným rychle akumulovat a následně odevzdat velké množství el. energie. Bez problémů snáší opakované nabíjení a vybíjení vysokými proudy, má dlouhou životnost, nevadí mu nízké provozní teploty a nedochází u něj k paměťovému efektu. [22]

Superkondenzátor (viz Obr. 5) se skládá z kladné a záporné elektrody z hliníkové fólie, dvou vrstev aktivního uhlíku a mezi nimi separátor. V nenabitém stavu jsou částice s nenulovým nábojem (ionty) rovnoměrně rozloženy ve vodivé tekutině, tekutém nebo gelovém elektrolytu, který se nachází mezi elektrodami. Po přiložení napětí na elektrody se začnou záporné ionty pohybovat ke kladné elektrodě a naopak kladné ionty k záporné elektrodě. Na obou elektrodách se tak vytvoří dvojvrstva se zrcadlovým rozložením elektrického náboje. Použitelné napětí je omezeno hodnotou disociačního napětí. Průrazné napětí elektrické dvojvrstvy je velmi nízké a tak typické provozní napětí superkondenzátorové buňky nepřesahuje 2,3 V.[4]



Obrázek 5 - Detail svitku superkondenzátoru [15]

#### Výhody:

- Mnoho nabíjecích a vybíjecích cyklů (řádově  $10^5$ )
- Vysoká účinnost (95% a více)

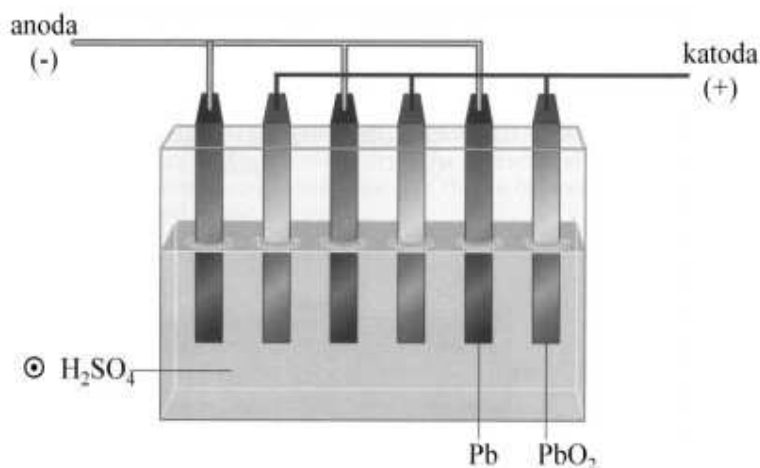
#### Nevýhody:

- Menší hustota energie (Wh/kg) oproti elektrochemickým článkům
- Výstupní napětí závislé na množství uložené energie [4]

## 2.3. Elektrochemická akumulace

### 2.3.1. Olověné akumulátory

Olověné akumulátory jsou složeny z olověných desek (anoda a katoda), které jsou v páru. Desky jsou ponořeny do nádoby, která obsahuje roztok kyseliny sírové. Při nabíjení se dodávaný nabíjecí proud z jiného zdroje se mění elektrická energie v chemickou energii a během vybíjení se akumulovaná energie mění na elektrickou a je dodávána zpět do elektrického odvodu, kde je akumulátor zapojen. Záporná elektroda je katodou během vybíjení a anodou během nabíjení. Při vybíjení reaktant oxiduje a volné elektrony předává záporné elektrodě. Kladná elektroda je anodou během vybíjení a katodou během nabíjení. Při vybíjení zde dochází k redukci reaktantu. Volné elektrony reaktant přijímá z kladné elektrody.[4]



Obrázek 6 - Schéma olověného akumulátoru [5]

#### Výhody:

- Nízká cena oproti Li-Ion akumulátorům

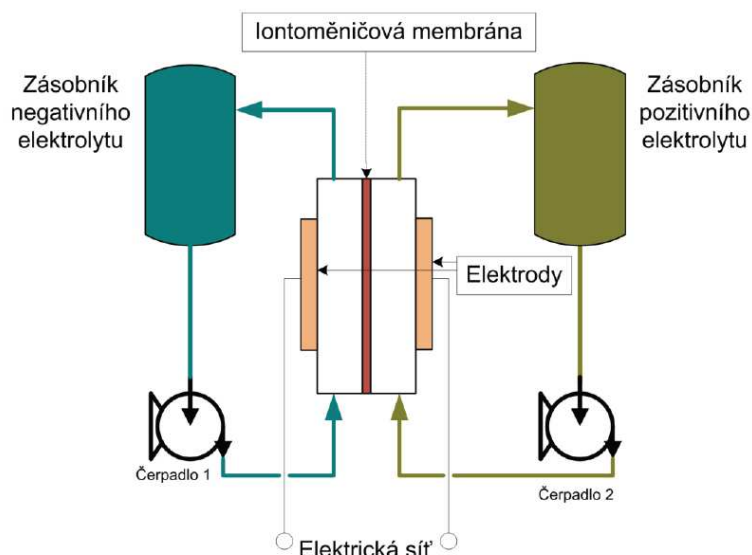
#### Nevýhody:

- Nízká hustota energie (Wh/kg)
- Relativně krátká životnost - cca 10 let (oproti Li-Ion bateriím)
- Relativně nízké nabíjecí proudy
- Samovybíjení (5% za měsíc) [4]

### 2.3.2. Průtokové baterie

Průtokové baterie skladují energii prostřednictvím tekutého elektrolytu a jsou nabíjeny stejně jako běžné baterie. Elektrolyt je vháněn do zásobních tanků a poté opět přiveden do chemického článku. Napětí článku se pohybuje v rozmezí 1,4 V - 1,8 V. Průtokové baterie se využívají tam, kde potřebujeme dlouhodobé zálohování. Princip průtokové baterie je uveden na obrázku 7. [10]

Měrná hmotnost článků se pohybuje od  $6,5 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$  do  $10 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ . Hmotnost elektrolytu představuje cca 90% hmotnosti celého zařízení, měrná hustota elektrolytu je cca 1,4. Podobně 85% až 90% zastavěného prostoru zaujímají zásobníky elektrolytu, 10% až 15% zůstává pro vlastní články a řídicí elektroniku. [3]



Obrázek 7 - Princip průtokové baterie [10]

#### Výhody:

- Relativně vysoká kapacita (oproti klasickým olověným akumulátorům)
- Nízké náklady

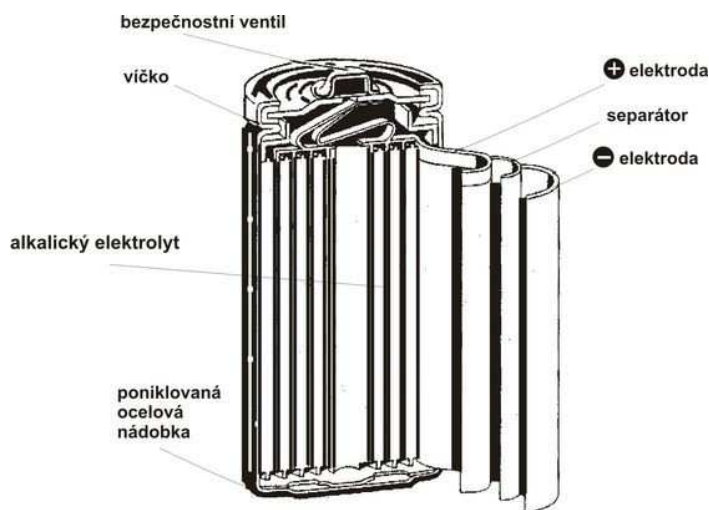
#### Nevýhody:

- Nízká hustota energie [10]

### 2.3.3. Alkalické akumulátory

#### 2.3.3.1. Nikl-kadmiové (Ni-Cd) akumulátory

Ni-Cd baterie pracují na podobném principu jako olověné baterie. Jen kladnou elektrodu tvoří hydroxid niklu a zápornou elektrodu kadmium, které jsou nejčastěji v alkalickém elektrolytu (hydroxid draselný). Ni-Cd mají vysokou spolehlivost v extrémních podmínkách, mají vyšší hustotu energie na jednotku provozu ( $100 \text{ Wh/dm}^3$ ), dobrou toleranci na přebíjení a přebití (přepólování), malé samovybíjení a v neposlední řadě mají dobrou životnost. Životnost je více než 500 cyklů při 80% deep of discharge (hloubka vybíjení).[4] Jejich největší problém je jejich složení. Oba dva kovy (Ni,Cd) jsou jedovaté a Cd je ještě k tomu vysoce nebezpečný karcinogenní kov. Vzhledem k tomu, že tyto kovy tedy značně ohrožují život člověka a životní prostředí, tak se od tohoto typu akumulátoru v posledních letech upouští. [4]



Obrázek 8 - Ni-Cd akumulátor [13]

#### Výhody:

- Spolehlivost
- Velký rozsah pracovních teplot ( $-40^{\circ}\text{C}$  až  $+70^{\circ}\text{C}$ )

#### Nevýhody:

- Nízká hustota energie ( $45\text{-}80 \text{ Wh/kg}$ )
- Škodlivost životnímu prostředí (obsahují toxické látky)
- Paměťový efekt (druhý vybíjecí stupeň) [13]



### 2.3.3.2. Lithiové akumulátory

Lithium-iontové baterie jsou druh nabíjecích baterií, v nichž kladná elektroda je z materiálu, který obsahuje ionty lithia a záporná elektroda je vyrobena z porézního typu uhlíku. Při vybíjení teče proud od anody ke katodě, jako ve všech typech baterií. Proces probíhající uvnitř baterie je pohyb kladných lithiových iontů přes elektrolyt a oddělovací membránu pro uhlíkové katody. Lithiové ionty jsou hluboce zakořeněné v materiálu katody v procesu známém jako interkalace. Při nabíjení proud prochází v opačném směru než při běžném provozu, kladný pól z nabíjecího obvodu musí být napojen na katodu Li-baterie a anoda musí být připojena k záporné svorce ve vnějším obvodu. Při procesu dobíjení probíhá interní změna, která je zvrtná a díky tomu se lithiové ionty uvolní z katody. V tomto ději se lithiové ionty za pomoci elektrolytu dostávají zpět přes membránu na anodu.

Tři základní funkční složky lithium-iontové baterie jsou anoda, katoda a elektrolyt, který se liší dle použitého materiálu. Komerčně, nejoblíbenějším materiálem pro anodu je grafit. Pro katodu je obvykle použit jeden z těchto materiálů: vrstevnatá struktura oxidu (jako oxid lithia a kobaltu ( $\text{LiCoO}_2$ ) známý jako kobaltitan lithný), elektrodové materiály založené na polyanionu (jako lithium železnatý fosfát s olivínovou strukturou) nebo materiál se spinelovou strukturou (jako  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ). V závislosti na volbě materiálu pro anodu, katodu a elektrolyt se může napětí, kapacita, životnost a bezpečnost lithium-iontových baterií dramaticky změnit. V nedávné době byly nové architektury zaměřeny na zlepšení výkonnosti těchto baterií. Lithium-ion baterie by neměly být zaměňovány s lithiovými bateriemi, kde zásadní rozdíl je v tom, že lithiové baterie obsahují kovové lithium, zatímco lithium-iontové baterie jsou sekundární články, které obsahují grafitové materiály pro anodu. [11]



Obrázek 9 - Lithiový akumulátor [17]

### Výhody:

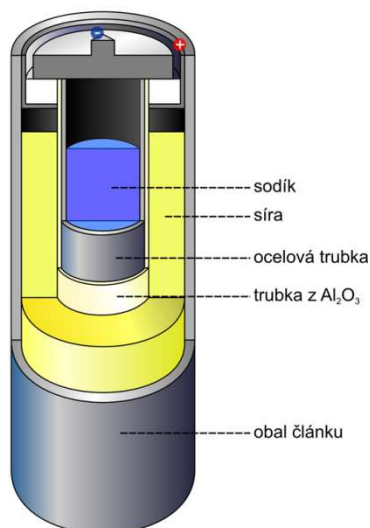
- Velmi vysoká hustota elektrické energie (200 Wh/kg)
- Životnost (10 let)
- Nízká hmotnost
- Bezúdržbový provoz

### Nevýhody:

- Samovybíjení (5 – 10% měsíc)
- Oproti jiným alkalickým akumulátorům vyšší cena [11] [4]

#### 2.3.3.3. Akumulátor Sodium – Sulfur (NaS)

Baterie NAS používá roztavený kov síry na kladné elektrodě, roztavený kov sodíku na záporné elektrodě a beta oxid hlinitý, který tvoří pevný elektrolyt. Během vybíjení se roztavený sodík chová jako anoda a roztavená síra jako katoda. Hliník je dobrý vodič sodných iontů, ale špatný vodič elektronu a tím se zabrání samovybíjení. Elektrolytem tedy projde kladný iont sodíku a spojí se sírou a vznikne jmenovité napětí 2V. Když se tedy baterie vybíjí, tak klesá množství sodíku. Během nabíjení probíhá proces naopak. Aby byl tento proces možný, tak akumulátory se udržují při teplotě kolem 300 °C.[4]



Obrázek 10 - Článek NaS [14]

## **Výhody**

- Vysoká účinnost
- Nepodléhají samovybíjení
- Velký počet cyklů

## **Nevýhody**

- Provoz při vysokých teplotách
- Není vhodné s nimi manipulovat [3]

## **2.4. Chemická akumulace – Akumulace do vodíku – Palivové články**

Palivový článek je elektrochemické zařízení, které přeměňuje chemickou energii v palivu během oxidačně-redukční reakce přímo v elektrickou energii. Skládá se z porézních elektrod oddělených elektrolytem. V oblasti pórů elektrod vzniká třífázové rozhraní – elektroda, elektrolyt a reagenty vzniklé oxidací paliva a redukcí okysličovadla. Základní princip transformace energie je pro všechny palivové články stejný, jednotlivé typy se však liší materiálem elektrod, použitým elektrolytem a pracovní teplotou i konkrétními chemickými reakcemi na anodě a katodě. [6]

### **2.4.1. Vodíkový akumulační systém**

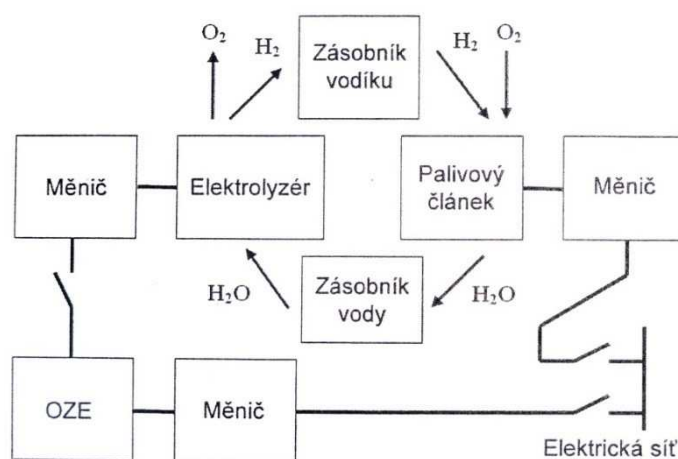
Hlavními částmi tohoto systému jsou elektrolyzátor, zásobník vodíku, zásobník demineralizované vody a vodíkové palivové články. Nezbytnými dalšími komponentami jsou polovodičové měniče, kompresory a ventilátory. Pro akumulaci elektrické energie pomocí vodíkových technologií a pro současné využívání výhod bezemisních OZE (obnovitelných zdrojů energie) je nutné vodík produkovat elektrolyzou vody. To znamená, že elektrická energie vyrobená v OZE se využije k výrobě vodíku z vody v zařízení zvaném elektrolyzátor, a to vždy v době, kdy je zatížení ES nižší. Vodík se uskládá v tlakovém zásobníku a v době zvýšeného zatížení ES se použije pro výrobu elektrické energie v palivovém článku, jehož dalšími odpadními produkty jsou jen voda a teplo. Vodík je tedy přenašečem energie, ne zdrojem. [1]

### Výhody:

- Nízké emise škodlivin
- Modulární koncepce

### Nevýhody:

- Manipulace s nebezpečnými plyny
- S počtem cyklů klesá účinnost
- Vysoké pořizovací náklady [6]



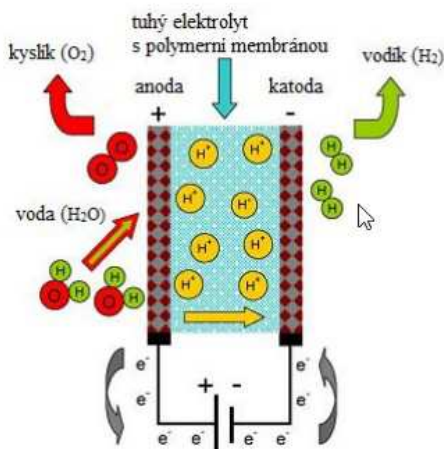
Obrázek 11 - Schéma vodíkového akumulčního systému [1]

#### 2.4.2. Elektrolyzér PEM

Princip funkce elektrolyzér s protonově vodivou membránou je v zásadě inverzní k principu činnosti palivového článku. Protonově vodivá membrána, k níž jsou připojeny porézní elektrody opatřené katalytickou vrstvou, je ponořena do vody a k elektrodám je připojen vnější zdroj proudu. Na anodě dochází k rozkladu molekul vody na vodík a kyslík. Zatímco kyslík uniká ve formě plynu pryč, vodík se naváže na katalytickou vrstvu elektrody, kde dojde k jeho oxidaci.

Zatímco protony jsou přitahovány skrz membránu (elektrolyt) k záporné katodě, elektrony odcházejí vnějším obvodem ke kladnému pólu zdroje. Na straně katody dochází k redukci protonů s elektrony z vnějšího zdroje za vzniku plynného vodíku.

V elektrolyzáru se tedy vždy dvě molekuly vody rozloží na dvě molekuly vodíku a jednu molekulu kyslíku – objemy vodíku a kyslíku, unikajících z elektrolyzáru za jednotku času, jsou tedy v poměru 2:1. [16]



Obrázek 12 - Princip membránového elektrolyzáru [12]

### 2.4.3. Palivový článek

Palivový článek je elektrochemické zařízení, které s relativně vysokou účinností, převádí chemickou energii reaktantů přímo na energii elektrickou a teplo. Základem palivového článku je vrstva elektrolytu nebo membrána, která je v kontaktu s porézními elektrodami, katodou a anodou. Typicky používané elektrolyty jsou např. H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, KOH, nebo keramiky či membrány povětšinou z fluovaných polymerů. [16]

***Podle provozní teploty se palivové články dělí:***

- Nízkoteplotní            60 ÷ 130 °C
- Středněteplotní       160 ÷ 220 °C
- Vysokoteplotní        600 ÷ 1050 °C

***Podle typu elektrolytu se palivové články dělí na články:***

- AFC - (Alkaline Fuel Cell) S alkalickým elektrolytem hydroxidem draselným KOH.
- PEM - (Polymer Electrolyte Membrane/Proton Exchange Membrane) S polymerní iontoměničovou membránou.
- PAFC - (Phosphoric Acid Fuel Cell) S kyselinou fosforečnou H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>
- MCFC – (Molten Carbonate Fuel Cell) S taveninou alkalických uhličitánů, karbidů lithia a draslíku.

- SOFC - (Solid Oxide Fuel Cell) S pevným oxidickým elektrolytem (obvykle  $Y_2O_3$  nebo  $ZrO_2$ ) [6] [3]

### 3. Rozpracování akumulace pomocí multikriteriální analýzy TOPSIS

#### 3.1. Teorie MCA TOPSIS

Metoda TOPSIS (metoda minimalizace vzdálenosti od ideální varianty) je založena na minimalizaci vzdálenosti od ideální varianty. Metoda poskytuje úplné uspořádání množiny všech variant, je tedy vhodná i pro výběr nejlepší varianty. Požadovanými vstupními údaji jsou kritériální hodnoty pro jednotlivé varianty a váhy jednotlivých kritérií.

Kritériální hodnoty pro jednotlivé varianty jsou uspořádány v kritériální matici  $Y = (y_{ij})$ , kde  $y_{ij}$  je hodnota  $i$ -té varianty hodnocené podle  $j$ -tého kritéria.

Metoda je založena na výběru varianty, která je nejbližší k ideální variantě reprezentované vektorem  $(H_1, H_2, \dots, H_k)$  a nejdále od bazální varianty reprezentované vektorem  $(D_1, D_2, \dots, D_k)$ .

Nejprve se konstruuje normalizovaná kritériální matice  $R = (r_{ij})$ , kde pro výpočet normalizovaných hodnot je navržen vzorec:

$$r_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} \quad (1)$$

Kde:

$$i = 1, 2, \dots, p$$

$$j = 1, 2, \dots, k$$

Po této transformaci jsou sloupce v matici  $R$  vektory jednotkové délky.

Následně vypočteme váženou kritériální matici  $W$  tak, že každý  $j$ -tý sloupec normalizované kritériální matice  $R$  násobíme odpovídající vahou  $v_j$ :

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1k} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2k} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_{p1} & w_{p2} & \dots & w_{pk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \cdot r_{11} & v_2 \cdot r_{12} & \dots & v_k \cdot r_{1k} \\ v_1 \cdot r_{21} & v_2 \cdot r_{22} & \dots & v_k \cdot r_{2k} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ v_1 \cdot r_{p1} & v_2 \cdot r_{p2} & \dots & v_k \cdot r_{pk} \end{bmatrix}$$

Nyní určíme ideální variantu  $H = (H_1, H_2, \dots, H_k)$  a bazální variantu  $D = (D_1, D_2, \dots, D_k)$  vzhledem k hodnotám ve vážené kritériální matici,

Kde:

$$H_j = \max_i(w_{ij}); \quad i = 1, 2, \dots, p$$

$$D_j = \min_i(w_{ij}); \quad j = 1, 2, \dots, k$$

Další krok spočívá ve výpočtu vzdáleností variant od ideální varianty

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^k (w_{ij} - H_j)^2}; i = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

a vzdáleností variant od bazální varianty

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^k (w_{ij} - D_j)^2}; i = 1, 2, \dots, p \quad (3)$$

V obou případech je použita Euklidova míra vzdálenosti.

Výpočet relativního ukazatele vzdáleností variant od bazální varianty:

$$c_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}; i = 1, 2, \dots, p \quad (4)$$

Pro hodnoty  $c_i$  platí:

$$0 \leq c_i \leq 1$$

$$c_i = 0 \Leftrightarrow a_i \approx (D_1, D_2, \dots, D_k)$$

$$c_i = 1 \Leftrightarrow a_i \approx (H_1, H_2, \dots, H_k) [7]$$

### 3.2. Volba variant a návrh kritérií pro MCA TOPSIS

Návrh kritérií je aplikován jen na vybrané varianty akumulace. Některé akumulční systémy uvedené v předchozí kapitole v současné době nepředstavují pro energetiku vhodné řešení. Jedná se především o supravodivé induktory, mechanické setrvačníky a některé typy elektrochemických akumulátorů. Jiné typy akumulace se nehodí ať už svou koncepcí, nebo sférou použití, aby mohly být vzájemně porovnány. Mezi tyto patří například akumulční systém CAES i PVE. Pro MCA TOPSIS byly tedy vybrány následující varianty akumulace.

- Varianty
  - Setrvačnick
  - Lithiové akumulátory
  - Vodíková technologie
  - Superkondenzátory

Kritéria byla zvolena na základě subjektivní volby zpracovatele, ve snaze zvolit ta nejrelevantnější pro dané použití akumulace.

- Kritéria
  - Pořizovací náklady (Kč/kWh)
  - Životnost (roky)
  - Účinnost (%)
  - Doba odezvy (s)
  - Měrná kapacita (Wh/kg)

### 3.3. Volba metody určování vah kritérií

Akumulace elektrické energie byla v TOPSIS analýze vyhodnocována pro reálné využití v ostrovním, hybridním decentralizovaném systému v kombinaci s fotovoltaickými panely, jako zdrojem elektrické energie. Váhy kritérií byly tedy voleny s přihlédnutím k tomuto faktu.

Jako metoda pro určení jednotlivých vah byla stanovena metoda kvantitativního párového srovnání kritérií, neboli Saatyho metoda.

#### 3.3.1. Teorie metody kvantitativního párového srovnání kritérií

Při vytváření matice párových srovnání  $S = (s_{ij})$ , kdy  $i, j = 1, 2, \dots, k$ , se často používá stupnice 1, 2, ..., 9 a reciproké hodnoty. Prvky matice  $s_{ij}$  jsou interpretovány jako odhady podílu  $i$ -tého a  $j$ -tého kritéria.

$$s_{ij} \approx \frac{v_i}{v_j}; \quad i, j = 1, 2, \dots, k \quad (5)$$

Této matici se říká Saatyho matice.



Důvody pro zvolený rozsah stupnice jsou okolnosti, že všechny prvky by měly být stejného řádu; existuje i odpovídající vhodná verbální stupnice:

- 1 – rovnocenná kritéria  $i$  a  $j$ ,
- 3 – slabě preferované kritérium  $i$  před  $j$ ,
- 5 – silně preferované kritérium  $i$  před  $j$ ,
- 7 – velmi silně preferované kritérium  $i$  před  $j$ ,
- 9 – absolutně preferované kritérium  $i$  před  $j$ ,
- Hodnoty 2, 4, 6, 8 vyjadřují mezistupně

Předpokládejme, že máme definovány prvky (kritéria)  $f_1, f_2, \dots, f_k$ . Vzájemným porovnáním těchto prvků se sestaví matice párových porovnání  $S = (s_{ij})$ , při  $i, j = 1, 2, \dots, k$ .

Matice párových porovnání  $S$  obsahuje kvantifikované informace od uživatele vztahu jednotlivých dvojic prvků. Prvek  $s_{ij}$  této matice můžeme interpretovat v podstatě jako poměr důležitosti prvků  $f_i$  a  $f_j$ . Z tohoto určení tedy vyplívají vlastnosti prvků této matice:

- prvky na diagonále  $s_{ij} = 1$  při  $i = 1, 2, \dots, k$ ,
- matice  $S$  je reciproční matice – platí tedy:  $s_{ij} = \frac{1}{s_{ji}}$

Matici  $S$  můžeme tedy zapsat následovně:

$$\begin{array}{cccc} f_1 & f_2 & \cdots & f_k \\ \begin{matrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_k \end{matrix} & = & \begin{bmatrix} 1 & s_{12} & \cdots & s_{1k} \\ 1/s_{12} & 1 & \cdots & s_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/s_{1k} & 1/s_{2k} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \end{array} \quad (6)$$

vzorec pro určení vah kritérií z geometrického průměru každého řádku této matice:

$$g_i = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k s_{ij}} \quad i, j = 1, 2, \dots, k \quad (7)$$

normalizace určených vah tak, aby byla splněna podmínka:

$$\sum_{i=1}^k v_i = 1 \quad v_i \geq 0 \quad (8)$$

vztah pro normalizaci:

$$v_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^k g_i} \quad i, j, = 1, 2, \dots, k \quad (9)$$

### 3.3.2. Aplikace metody kvantitativního párového srovnání kritérií

V tabulce 1 je aplikována metoda kvantitativního párového srovnání na jednotlivá kritéria.

Tabulka 1 - Matice párových porovnání

	Požizovací náklady	Životnost	Účinnost	Měrná kapacita	Doba odezvy
Požizovací náklady	1	3	4	5	6
Životnost	1/3	1	3	5	7
Účinnost	1/4	1/3	1	2	3
Měrná kapacita	1/5	1/5	1/2	1	2
Doba odezvy	1/6	1/7	1/3	1/2	1

Příklad výpočtu geometrického průměru 1 řádku z tabulky 1:

$$g_1 = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k s_{ij}} = \sqrt[5]{1 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6} = 3,245 \quad (10)$$

Příklad výpočtu normalizace 1 řádku z tabulky 1:

$$v_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^k g_i} = \frac{3,245}{3,245 + 0,871 + 0,525 + 0,331} = 0,463 \quad (11)$$

Výsledné váhy jednotlivých kritérií:

Tabulka 2 - Výsledné váhy jednotlivých kritérií

kritérium	váha
Pořizovací náklady	0,463
Životnost	0,291
Účinnost	0,124
Měrná kapacita	0,075
Doba odezvy	0,047
Suma vah	1

### 3.4. Rozbor výsledných vah pro jednotlivá kritéria

#### 3.4.1. Pořizovací náklady

Váha pořizovacích nákladů vyšla z párového porovnání jako největší. Je to dáno faktem, že celý systém se pořizuje z důvodu efektivnějšího využití energie z obnovitelných zdrojů, jejichž samotná instalace je z velké části realizována za účelem úspory financí. Toto kritérium jde ruku v ruce s kritériem posuzujícím životnost systému a velikost váhy dosahuje 46,3 %.

#### 3.4.2. Životnost

Spolu s kritériem pořizovacích nákladů vytváří základní údaj o parametrech akumulčního systému, na který se klade vysoký důraz. Obecně se dá říci, že čím více rostou pořizovací náklady u systému, tím vyšší životnost od něj můžeme očekávat. Nejde tedy trvat na nízkých pořizovacích nákladech a přitom přikládat stejnou důležitost tomuto kritériu. Hodnota tohoto kritéria činí ve výsledku 29,1 %.

#### 3.4.3. Účinnost

Účinnost akumulčního systému se v hodnocení v MCA řadí na třetí místo. Opět je zde argument, že při kladení důrazu na cenu, nelze požadovat přehnané požadavky na protichůdné kritérium. Z technického hlediska se do akumulčního systému ukládá nepotřebná energie, která by v opačném případě nebyla využita vůbec. Nutno podotknout, že kromě vodíkové technologie se ostatní akumulční systémy pohybují se svou účinností kolem 90%. Váha u kritéria účinnost tedy vyšla 12,4 %

### 3.4.4. Měrná kapacita

Toto kritérium se v pořadí vah umístilo na 4 místě. Jedná se o technický parametr akumulčního systému, který by byl podstatný, pokud bychom na omezeném prostoru chtěli skladovat co nejvíce energie. Hodnota vah 7,5 % odpovídá reálným nárokům na tento akumulční systém.

### 3.4.5. Doba odezvy

Doba odezvy je nejméně podstatný parametr. Je to dáno tím, že v samotné analýze nejsou porovnávány systémy, které by měly tuto dobu delší než v řádu desítek ms. Váha zde dosahuje 4,7 % a v MCA je téměř zanedbatelná.

## 3.5. Aplikace a zhodnocení MCA TOPSIS

### 3.5.1. Výpočet optimální varianty pomocí MCA TOPSIS

Pro účely této diplomové práce byla metoda TOPSIS rozpracována v tabulkovém procesoru MS Excel, podle kapitoly 2.1.

Tabulka 3 - Přehled variant s hodnotami jednotlivých kritérií [9]

Varianty	Cena (Kč/kWh)	Účinnost (%)	Životnost (roky)	Doba odezvy (s)	Hustota elektrické energie (Wh/kg)
Li-ion	15000	90	15	0,1	200
Setrvačnick	125000	93	15	0,01	30
Superkapacitory	50000	95	20	0,01	15
Vodíková technologie	250000	40	15	1	5000

Z tabulky 3, se vypočítá normalizovaná matice (tabulka 4)  $R = r_{ij}$  podle vzorce:

$$r_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} \quad (12)$$

Tabulka 4 - Normalizovaná matice

0,0528	0,5440	0,4575	0,0995	0,0400
0,4396	0,5621	0,4575	0,0099	0,0060
0,1758	0,5742	0,6100	0,0099	0,0030
0,8792	0,2418	0,4575	0,9949	0,9992

Dále se sestaví vážená kritériální matice  $W$ :

Tabulka 5 - Vážená kritériální matice

0,0244	0,1580	0,0568	0,0075	0,0019
0,2036	0,1633	0,0568	0,0007	0,0003
0,0814	0,1668	0,0758	0,0007	0,0001
0,4071	0,0702	0,0568	0,0746	0,0472

Určíme ideální ( $H$ ) a bazální variantu ( $D$ ):

Tabulka 6 - Ideální a bazální varianta

$H$	0,0244	0,1668	0,0758	0,0007	0,0472
$D$	0,4071	0,0702	0,0568	0,0746	0,0001

Vypočteme vzdálenosti jednotlivých variant od varianty ideální:

Tabulka 7 - Vzdálenosti jednotlivých variant od ideální varianty

Varianta	$d_i^+$	$d_i^-$
Li-ion	0,05	0,40
Setrvačnick	0,19	0,24
Superkapacitory	0,07	0,35
Vodíková technologie	0,40	0,05

Výpočet relativních ukazatelů vzdáleností  $c_i$  a vyjádření míry vhodnosti varianty v procentech.

Tabulka 8 - Výpočet relativních ukazatelů vzdáleností

Varianta	$c_i$	%
Li-ion	0,89	37,4
Setrvačnick	0,56	23,5
Superkapacitory	0,82	34,7
Vodíková technologie	0,10	4,4

### 3.6. Zhodnocení výsledků MCA TOPSIS

Na základě přechozích kapitol byly určeny patřičné váhy jednotlivým kritériím a pomocí multikritériální analýzy TOPSIS proběhlo vyhodnocení optimální akumulace

energie z fotovoltaických panelů ve výkonovém měřítku řádově několika desítek kW. Výsledky se nevychylují od předběžných odhadů a potvrzují již osvědčené systémy v daných oblastech. V hybridních systémech se dnes prakticky výhradně využívají Lithiové akumulátory, které dosáhly hodnocení 37 % a to především díky své životnosti, hustotě elektrické energie a přijatelným pořizovacím nákladům. Vodíková technologie, kterou se zabývá dále praktická část této práce, dopadla v MCA TOPSIS se 4,4 procenty nejhůře. Je to dáno především cenou a nízkou účinností celého systému. Systém akumulace elektrické energie do vodíku je v současné době spíše ve výzkumné fázi.

## **4. Akumulace elektrické energie do vodíku pomocí elektrolyzéru**

### **4.1. Popis laboratoře palivových článků**

Praktické měření akumulace elektrické energie do vodíku bylo realizováno v laboratoři palivových článků, která se nachází na akademické půdě VŠB-TU Ostrava. V této laboratoři je instalován systém na přeměnu elektrické energie z fotovoltaických panelů pomocí elektrolyzéru do vodíku a následně zpětným procesem palivovými články zpátky na energii elektrickou. V laboratoři jsou umístěny i pomocné technologie, jako například olověné akumulátory, které pokrývají přebytky elektrické energie, které vznikají větším výkonem FV panelů, než je příkon elektrolyzéru.

Seznam instalované technologie v laboratoři:

- Polykrystalické FV panely Schott Poly 165
- Polovodičové měniče (Sunny Island Charger 40, Sunny Island 42 82)
- Olověné baterie Fiamm 12 FLB 300
- Elektrolyzér Hogen GC600
- Tlakové láhve
- Modul palivového článku NEXA Ballard Power Systém
- AC zátěž tvořená svítlidly
- Řídicí systémy (PLC moduly) [8]

#### 4.1.1. Polykrystalické FV panely

Fotovoltaické panely Schott Poly 165 jsou umístěné na střeše laboratoře. Jsou umístěny v celkovém počtu 12 panelů se sklonem 50° a orientací na jihozápad. Výkon jednoho panelu dosahuje 165 Wp, celkově potom tedy 1980 Wp. Panely jsou zapojeny sérioparalelně. [8]



Obrázek 13 - FV panely Schott Poly [8]

#### 4.1.2. Olověné baterie Fiamm 12 FLB 300

Olověné baterie slouží jako záložní akumulací element, v případě, že výkon FV panelů překročí příkon elektrolyzéru. Celková kapacita baterií dosahuje 3600 Wh. Teoreticky jsou schopny akumulovat energii z instalovaných FV panelů při jejich plném výkonu po dobu 2 hodin. [8]



Obrázek 14 - Olověné baterie [8]

#### 4.1.3. Polovodičové měniče

V procesu ukládání energie z FV panelů přes elektrolyzátor do vodíku v tlakových lahvích se používají dva polovodičové měniče.

- Sunny Island Charger 40 je DC/DC měnič, který slouží jako regulátor dobíjení baterií z FV panelů
- Sunny Island 4282 je DC/AC střídač, který akumulovaný stejnosměrný proud z akumulátorů, nebo stejnosměrný proud produkovaný z FV panelů převede na proud střídavý, kterým se následně napájí elektrolyzátor [8]



Obrázek 15 - Polovodičové měniče [8]

#### 4.1.4. Elektrolyzátor

Elektrolyzátor Hogen Gc 600, který byl použit pro přeměnu elektrické energie na vodík se skládá z elektrody, separátoru plynu k oddělení vyrobeného vodíku a kyslíku, elektrolytu, kterým je Nafion (sulfonový tetrafluorethylen) a vody jako reagujícího média, jež dále slouží k ochlazení. Jedná se o elektrolyzátor typu PEM (Proton Exchange Membrane). [8]



Obrázek 16 - Elektrolyzátor HOGEN Gc 600 [8]



Tabulka 9 - Technické parametry elektrolyzéru HOGEN GC 600 [8]

Dodávaný tlak	3 - 13,79 bar
Čistota vodíku	100,00 %
Kapacita nádrže DI vody	1,9 l - Od plné úrovně do vypínací úrovně
Spotřeba energie	<1200 W
Maximální průtok vodíku	0 - 600 cm <sup>3</sup> /min
Trvanlivost vodní nádrže	> 100 hodin nepřetržitého provozu

#### 4.1.5. Průtokoměr

Průtokoměr Aalborg XFM17 v laboratoři slouží pro zjišťování množství vyrobeného vodíku. Na LCD displeji zobrazuje aktuální průtok vodíku (l/min) a informaci, kolik tohoto plynu průtokoměrem proteklo celkově. Konektivita tohoto přístroje je možná přes dvě digitální rozhraní RS232 a RS485. [8]



Obrázek 17 - Průtokoměr Aalborg XFM17 [8]

#### 4.1.6. Tlakové láhve

Vodík je uskládán v tlakových lahvích, které jsou v laboratoři k dispozici ve dvou svazcích po 12 kusech. Láhev je vyrobena z legovaných chrom-molybdenových ocelí. Díky tomu, že lahev je dimenzována na tlak 200 barů, dokáže pojmout až 9 m<sup>3</sup> vodíku. Vzhledem k maximálnímu výstupnímu tlaku vodíku z elektrolyzéru se jedna tlaková láhev naplní na cca 680 l, což odpovídá tlaku cca 13,74 barů. Pro účely měření byly využity 3 tyto lahve, viz.: Obrázek 18. [8]



Obrázek 18 - Tlakové láhve [8]

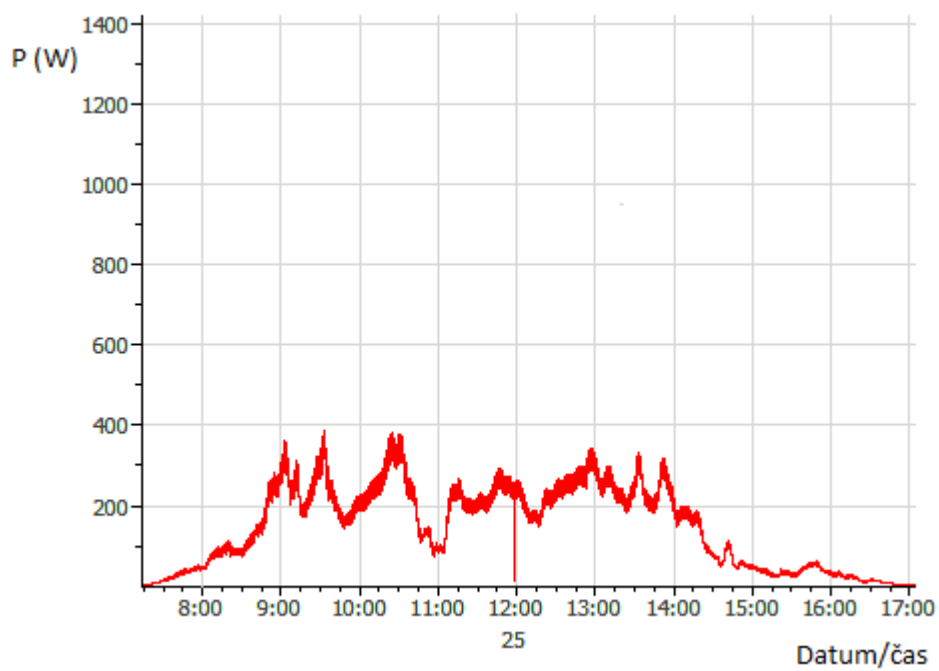
## **4.2. Rozbor dat, naměřených na FV panelech**

Měření na fotovoltaických panelech proběhlo v období 25 září 2015 až 3 října. Pro účely této práce byly vybrány 2 podprůměrně a 2 nadprůměrně slunečné dny. Data byla vyhodnocena způsobem, aby byl simulován odběr energie elektrolyzérem. Okamžitá přebytečná elektrická energie, byla vynásobena koeficientem účinnosti olověných akumulátorů 0,8, čímž bylo simulováno její uložení, o které byla ponížena celková výroba z vyhodnocovaného dne.

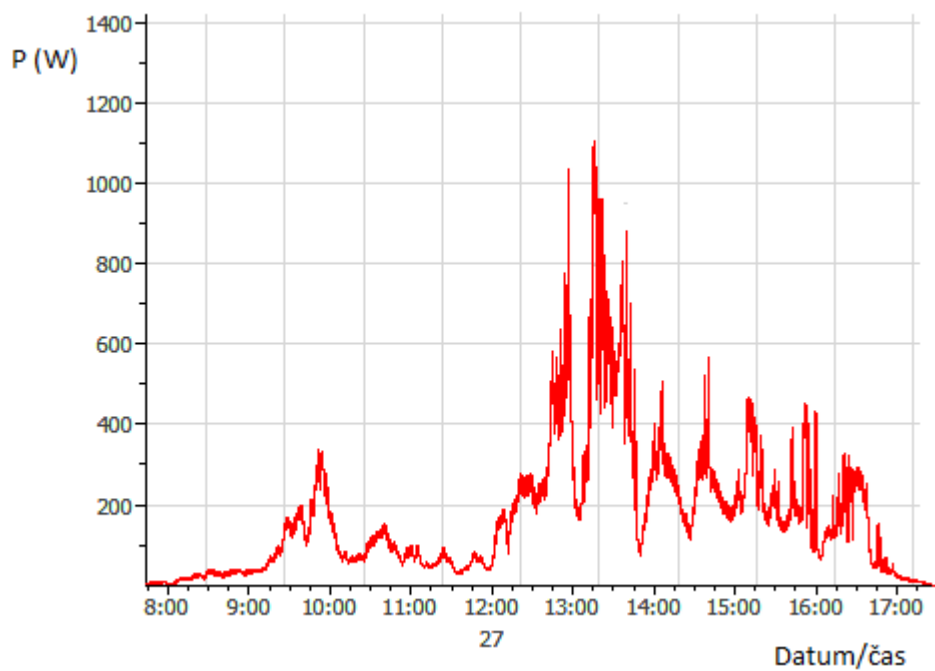
### **4.2.1. Slunečně podprůměrné dny**

Jako slunečně podprůměrné dny byly vybrány 25 a 27 září 2015. Hodnota slunečního záření těchto dnů byla na tak špatné úrovni, že okamžitá hodnota elektrického výkonu z FV panelů v podstatě nedosáhla ani 750 W, které elektrolyzátor minimálně potřebuje pro svou činnost. Z tohoto důvodu byl zaveden předpoklad, že veškerá energie z FV panelů je ukládána do olověných akumulátorů a teprve potom využita k výrobě vodíku.

Na obrázku 19 a 20 je znázorněn průběh okamžitého výkonu v závislosti na čase z výše zmiňovaných slunečně podprůměrných dnů. Z grafů je patrné, že hodnota okamžitého výkonu ze dne 25 září dosahuje ve špičkových maximech přibližně 350 – 400 Wattů. Graf z 27 září vykazuje, že výkon přesahoval 600 W, nicméně v tak krátkém časovém úseku, že je téměř zanedbatelný a suma energie, která se toho dne dostala přes tuto úroveň, se pohybuje pouze okolo 60 Wh.



Obrázek 19 - Průběh výkonu na FV panelech ze dne 25. 9. 2015



Obrázek 20 - Průběh výkonu na FV panelech ze dne 27. 9. 2015

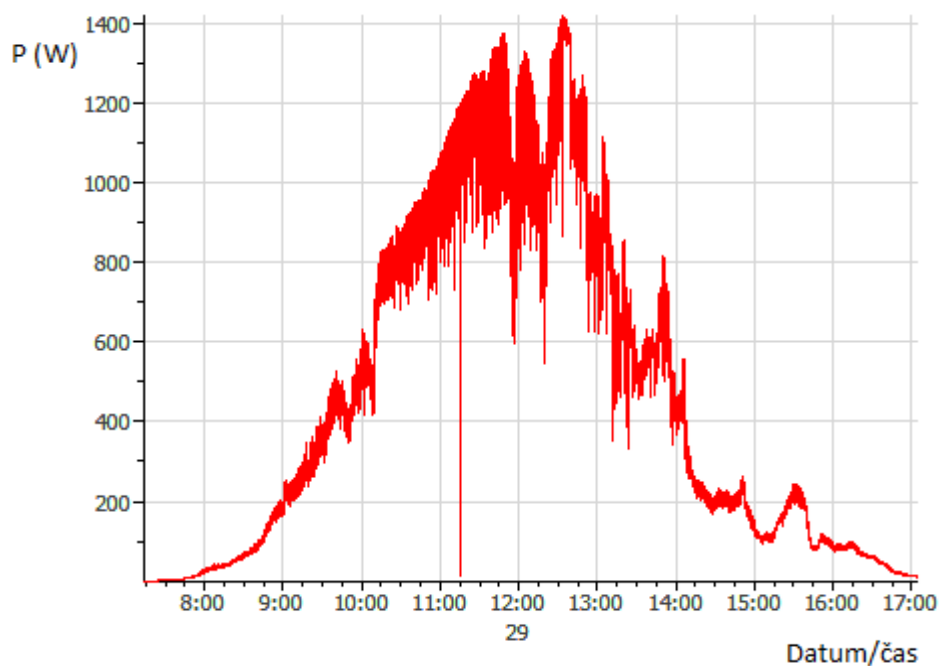
V tabulce 10 je čistý výpočet celkového výkonu z jednotlivých dnů se započítáním účinností jednotlivých systémů.

Tabulka 10 - Výkon z FV panelů ze dne 25. a 27. září 2015

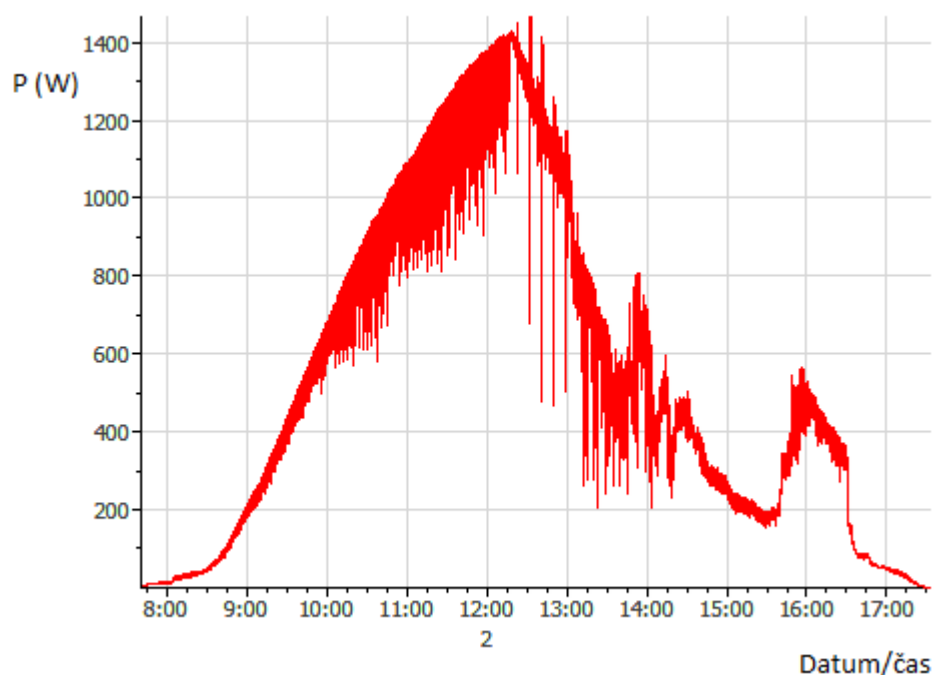
Datum	Začátek výroby	Konec výroby	Doba výroby	Celkové množství vyrobené energie (Wh)	Energie uložená do akumulátorů (Wh)	Celková energie spotřebovaná elektrolyzérem (Wh)
25. 9. 2015	7:33:53	16:48:20	9:14:27	1518	1518	<b>996</b>
27. 9. 2015	7:49:36	17:19:29	9:29:53	1737	1737	<b>1140</b>

#### 4.2.2. Slunečně nadprůměrné dny

Dny 29. září a 2. října 2015 byly vybrány jako slunečně nadprůměrné. Průběhy okamžitého výkonu jsou znázorněny na obrázku 21 a 22 v závislosti na čase. U těchto dnů se výkon pohyboval přes hodnotu 600 W cca mezi 10 – 14 hodinou a dosahoval maximální hodnoty okolo 1400W. Výkon, který není elektrolyzér schopen zpracovat je ve výpočtech ponížen o účinnost akumulátorů a následně uveden v tabulce 11.



Obrázek 21 -Průběh výkonu na FV panelech ze dne 29. 9. 2015



Obrázek 22 - Průběh výkonu na FV panelech ze dne 2. 10. 2015

Tabulka 11 - Výkon z FV panelů ze dne 25. a 27. září 2015

Datum výroby	Začátek výroby	Konec výroby	Doba výroby	Celkové množství vyrobené energie (Wh)	Energie uložená do akumulátorů (Wh)	Celková energie spotřebovaná elektrolyzérem (Wh)
29. 9. 2015	7:51:21	17:10:51	9:19:30	4762	2267	3533
2. 10. 2015	7:53:23	17:22:05	9:28:42	5478	2665	4055

Z výsledků tohoto měření je patrné, že v případě slunečně podprůměrných dnů jde veškerý výkon z FV panelů přes sekundární akumulaci do olověných akumulátorů, čímž se snižuje efektivita výroby o účinnost baterií. U slunečně nadprůměrných dnů se do akumulátorů ukládá větší polovina elektrické energie z FV panelů.

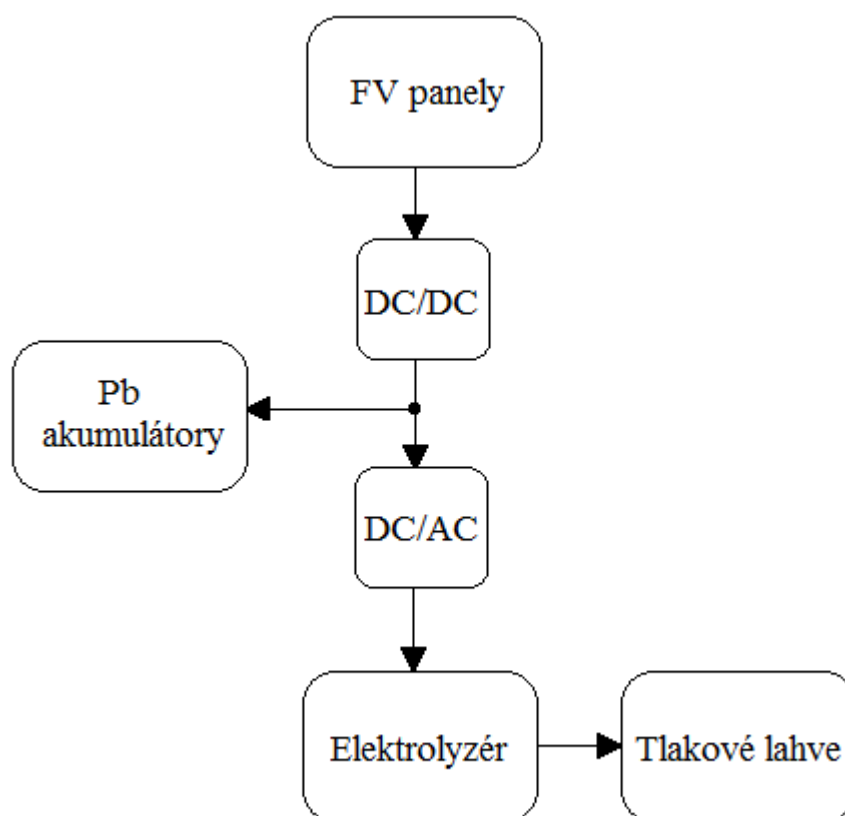
Tyto výsledky budou dále použity pro vyhodnocení celkové efektivity akumulace elektrické energie do vodíku.

### 4.3. Rozbor dat, naměřených na elektrolyzáru

#### 4.3.1. Průběh měření

Měření na elektrolyzáru HOGEN GC600 zahrnovalo měření příkonu elektrické energie pomocí síťového analyzátoru ENA 330.11, množství vyrobeného vodíku průtokoměrem Aalborg XFM17, tlak vodíku odečítaný přímo z displeje elektrolyzáru a teplotu vody v nádrži elektrolyzáru.

Měření mělo tři fáze. V první fázi docházelo v elektrolyzáru k zahřátí na provozní teplotu a trvalo 8 minut 41 sekund. Ve fázi druhé k natlakování, které zabralo 3 minuty a 28 sekund. Třetí fáze zahrnovala samotnou výrobu vodíku, která byla provozována po dobu 32 minut. Na obrázku 23 je blokové schéma technologie pro akumulaci elektrické energie do vodíku.



Obrázek 23 - Blokové schéma akumulace do vodíku

#### 4.3.2. Výsledky měření

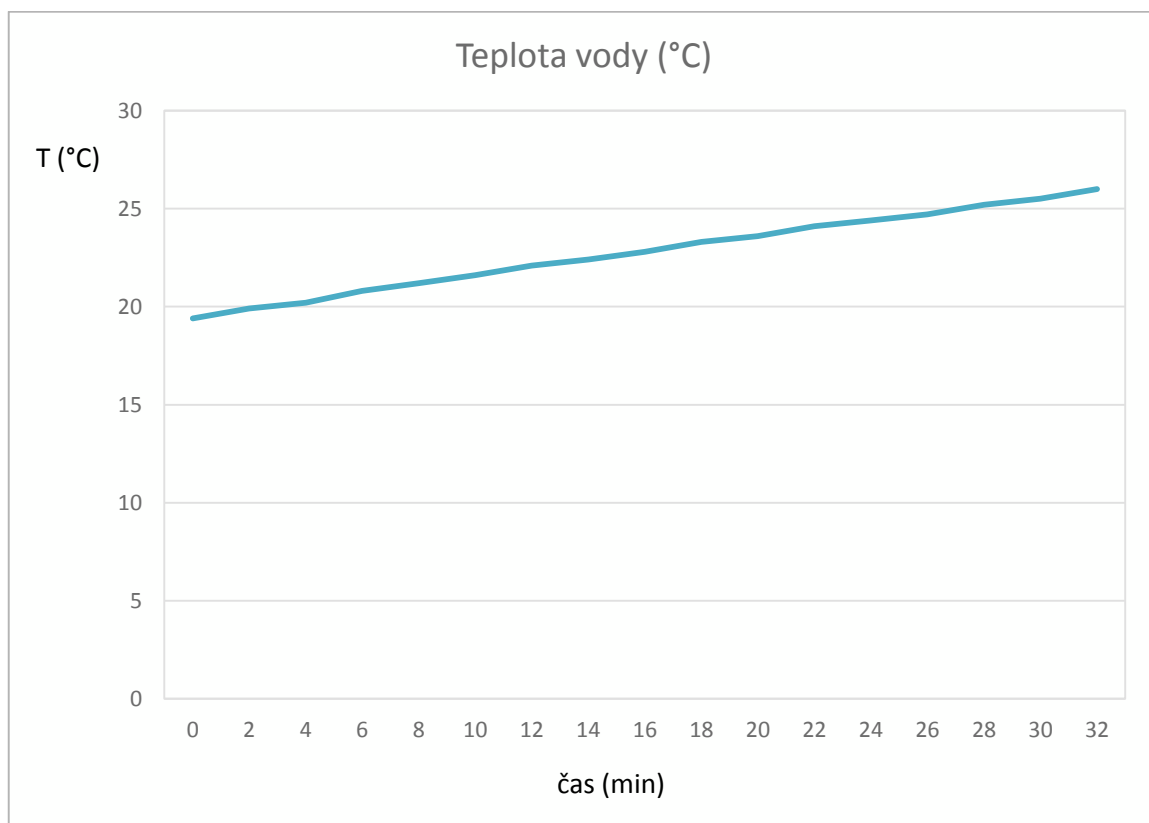
Tabulka 12 - Hodnoty tlaku, teploty a množství vodíku v průběhu výroby

čas (min)	Tlak (bar)	Teplota vody (°C)	Množství vodíku (l)
0	2,62	19,4	0
2	2,62	19,9	1,91
4	2,62	20,2	3,36
6	2,69	20,8	4,73
8	2,69	21,2	6,1
10	2,69	21,6	7,41
12	2,69	22,1	8,75
14	2,69	22,4	10,05
16	2,69	22,8	11,38
18	2,69	23,3	12,7
20	2,69	23,6	14,02
22	2,69	24,1	15,5
24	2,83	24,4	16,64
26	2,83	24,7	17,96
28	2,83	25,2	19,28
30	2,83	25,5	20,59
32	2,83	26	21,91

V tabulce 12 jsou uvedeny výsledky z naměřených neelektrických veličin. Nejdůležitější je množství vyrobeného vodíku, které po celou dobu měření stoupalo lineárním trendem, jak je patrné z obrázku 24 v závislosti na čase. Stejně tomu tak bylo u teploty vody viz. obrázek 25, (teplota vody v závislosti na čase).

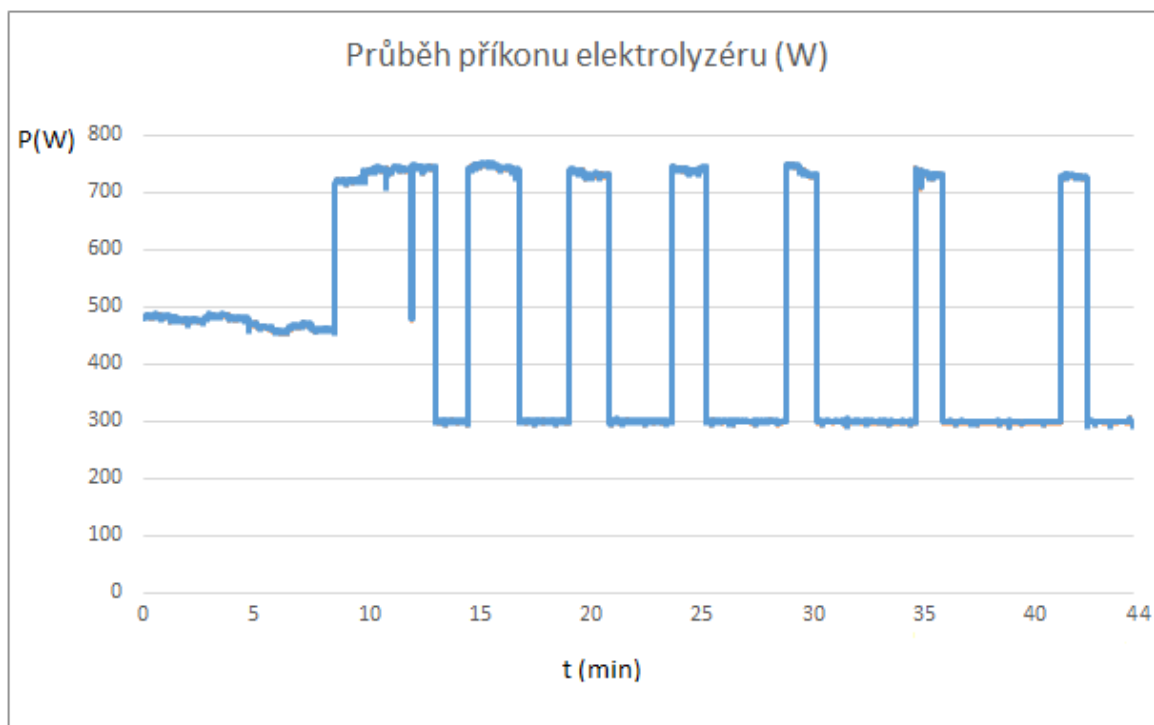


Obrázek 24 - Množství vyrobeného vodíku



Obrázek 25 - Teplota demineralizované vody v elektrolyzáru





Obrázek 26 - Průběh příkonu na elektrolyzáru

Obrázek 26 znázorňuje okamžité hodnoty příkonu elektrolyzáru. Graf zahrnuje všechny části měření (nahřívání, tlakování, výrobu). Z grafu je patrné, že s delší dobou výroby vodíku se prodlužuje mezera mezi špičkami, aniž by se tato skutečnost projevovала na nějaké nelinearitě ve výrobě vodíku v čase, jak je patrné s obrázkem 24.

V tabulce 13 je mj. uveden celkový příkon do elektrolyzáru za celou dobu měření. Výsledky tohoto měření budou v následující kapitole teoreticky zpracovány spolu s daty naměřenými na fotovoltaických panelech.

Tabulka 13 - Celková spotřeba přípravné a měřicí fáze

	Doba trvání	Spotřebovaná energie (Wh)
nahřívání + tlakování	00:12:06	110
výroba	00:32.34	239
<b>celkem</b>	<b>00:44:40</b>	<b>349</b>

Výsledky tohoto měření budou v následující kapitole teoreticky zpracovány spolu s daty naměřenými na fotovoltaických panelech.

## **4.4. Rozbor dat naměřených na FV panelech a elektrolyzéru**

### **4.4.1. Teoretický úvod**

V kapitole 4.2 byla rozebrána data z fotovoltaických panelů ze čtyř účelově vybraných dnů. V kapitole 4.3 byl analyzován příkon elektrolyzéru při provozu a to po dobu přibližně 45 minut. Cílem této kapitoly je aplikovat poznatky z měření elektrolyzéru na data, která byla naměřena na fotovoltaických panelech v září a říjnu roku 2015. Vzhledem k neregulárnímu časovému sběru informací v těchto měřeních zde došlo ke korekci v podobě prodloužení doby chodu elektrolyzéru na základě předpokládaného trendu z naměřených hodnot.

Finálním cílem tohoto rozboru bylo zjistit, po jakou dobu by mohl elektrolyzátor v případě jednotlivých dnů fungovat, kolik litrů vodíku by vyrobil a jaké energetické bilance by dosahoval.

### **4.4.2. Základní principy pro rozbor**

Jeden ze základních aspektů tohoto rozboru je fakt, že energie ze slunečního záření je přeměněna na vodík, který je uskladněn v tlakových lahvích a jeho další využití zde není dále rozebíráno. Systém, který zpracovává tuto přeměnu, pracuje s jistou účinností, která je dána účinností jednotlivých prvků, které byly výše v této práci uvedeny a popsány. V další kapitole je rozebrána konkrétní politika akumulace, která je zde aplikována.

### **4.4.3. Metodika akumulace**

Jelikož jednotlivé systémy pracují s různou účinností, je snahou, aby energie ze slunečního záření, která je dále použita k výrobě vodíku byla co nejméně zpracovávána pomocí technologických mezičlánků. Nicméně faktem je, že při výrobě vodíku pomocí daného elektrolyzéru docházelo k přebytkům elektrické energie z FV panelů a tím k riziku nevyužití této energie. Z tohoto důvodu byly do systému vřazeny olověné akumulátory, jejichž úkolem bylo těmto potencionálním ztrátám zabránit.

Po přihlédnutí k těmto aspektům byla data naměřená na elektrolyzéru aplikována na konkrétní dny ze září a října roku 2015 a byla vyhodnocena celková doba využití elektrolyzéru, množství vyrobeného vodíku a celkové ztráty v systému.

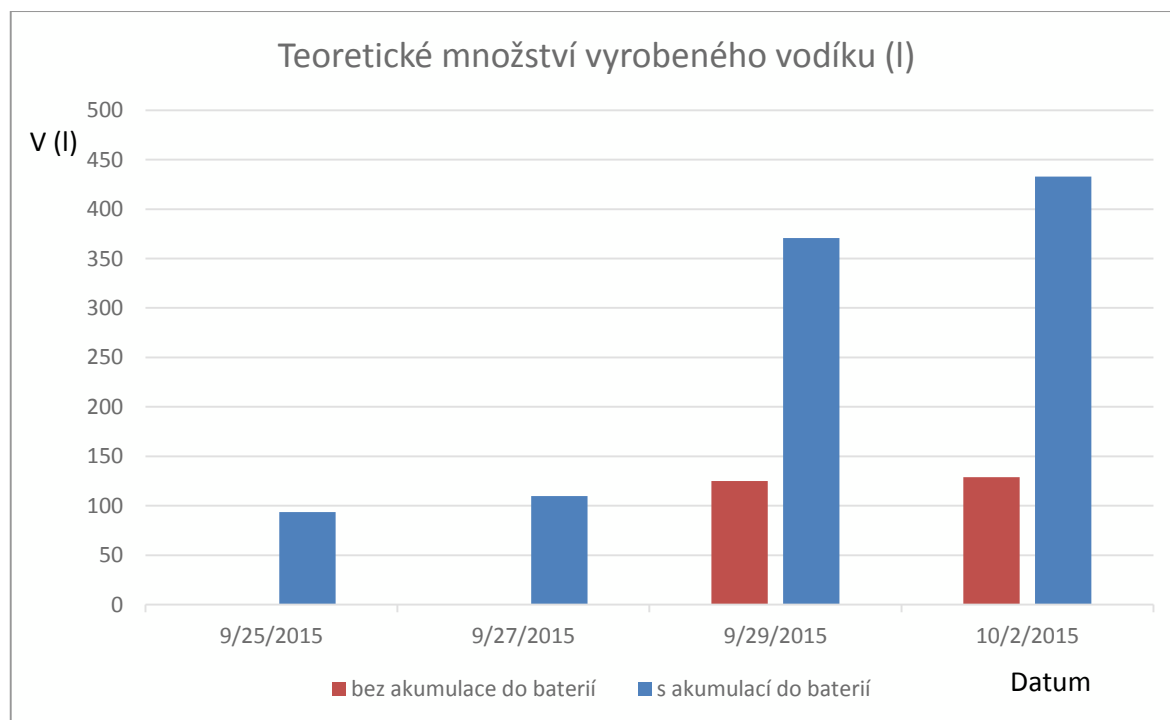
#### 4.4.4. Teoretické výsledky akumulace el. energie do vodíku

Na základě dat naměřených na elektrolyzáru a posléze jejich aplikování na data získané z měření na fotovoltaických panelech bylo určeno, kolik litrů vodíku by bylo možno vyrobit během analyzovaných dnů. V tabulce 14 jsou uvedeny výsledné teoretické výsledky z provozování elektrolyzáru v jednotlivých dnech.

Tabulka 14 – Teoretické výsledky akumulace el. energie do vodíku

Datum	Celková energie spotřebovaná elektrolyzérem (Wh)	Doba výroby vodíku	Množství vyrobeného vodíku (l)	Zmařená energie (Wh)	Nevyužitá energie bez použití akumulátorů (Wh)
25. 09. 2015	996	2:16:56	94	522	996
27. 09. 2015	1140	2:40:30	110	598	1140
29. 09. 2015	3496	9:01:37	371	1267	3832
02. 10. 2015	4055	10:32:02	433	1423	4547

Na obrázku 27 je grafické znázornění teoretického množství vyrobeného vodíku v jednotlivých dnech, přičemž slunečně nadprůměrné dny jsou doplněny o variantu bez akumulace elektrické energie do akumulátorů.



Obrázek 27 - Množství vyrobeného vodíku

Příklad výpočtu ekvivalentního množství energie ve vyrobeném vodíku:

$$E_{H2} = \frac{V_{H2}}{V_{molH2}} \cdot Q_t \cdot U_{ROV} = \frac{371}{22,14} \cdot 53,6 \cdot 1,23 = 1104 \text{ Wh} \quad (13)$$

kde:  $E_{H2}$  ... ekvivalentní množství energie ve vyrobeném vodíku (Wh)  
 $V_{H2}$  ... množství vyrobeného vodíku (litry)  
 $Q_t$  ... velikost elektrického náboje potřebného pro výrobu 1 molu vodíku (Ah)  
 $U_{ROV}$  ... rovnovážné napětí chemické reakce probíhající v elektrolyzáru (V)  
 $V_{molH2}$  ... objem 1 molu vodíku (litry)

Příklad výpočtu účinnosti elektrolyzy:

$$n_E = \frac{E_{celk}}{E_{H2}} = \frac{3496}{1104} \cdot 100 = 31,6 \% \quad (14)$$

kde:  $n_E$  ... účinnost elektrolyzy (%)  
 $E_{celk}$  ... celková energie spotřebovaná elektrolyzérem (Wh)  
 $E_{H2}$  ... ekvivalentní množství energie ve vyrobeném vodíku (Wh)

Příklad výpočtu celkové účinnosti:

$$n_{Celk} = n_E \cdot n_{pb} \cdot n_m \cdot 100 = 0,316 \cdot 0,8 \cdot 0,82 \cdot 100 = 20,8 \% \quad (15)$$

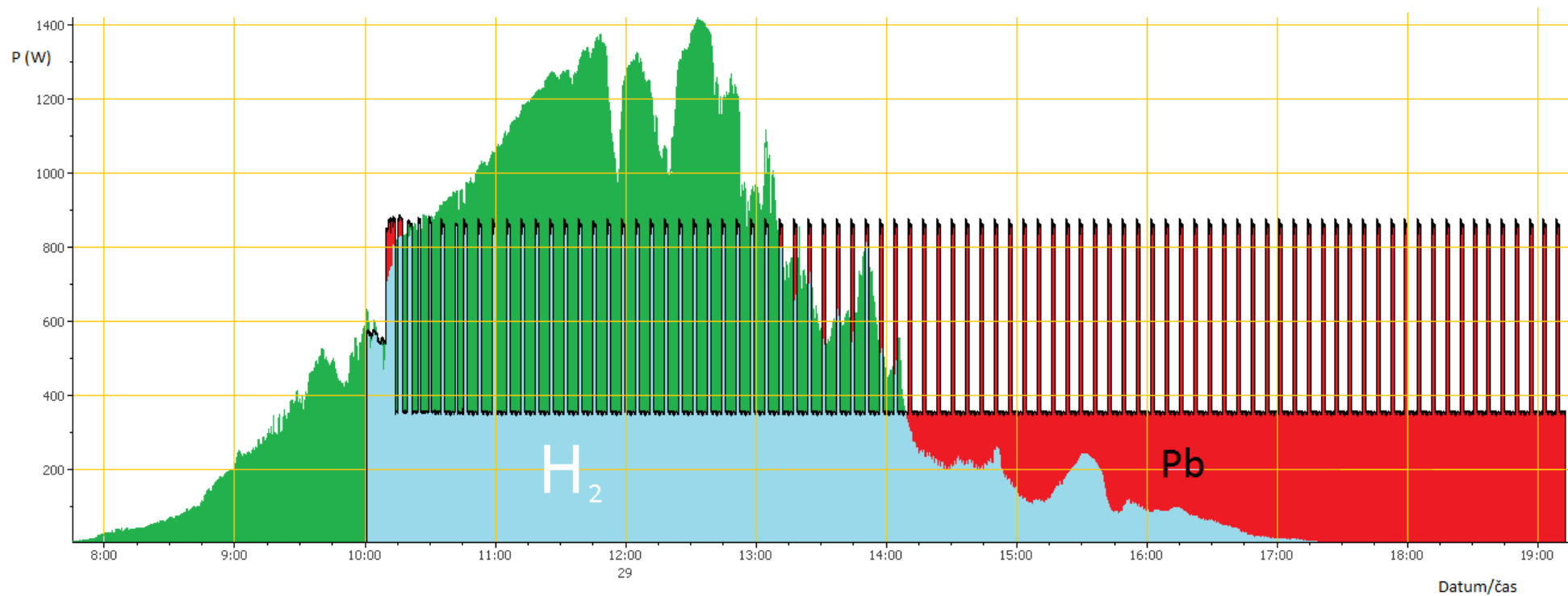
kde:  $n_{Celk}$  ... celková účinnost systému (%)  
 $n_E$  ... účinnost elektrolyzáru (%)  
 $n_{pb}$  ... účinnost olověných akumulátorů (%)  
 $n_m$  ... účinnost měničů (%)

Tabulka 15 - Energetická bilance systému

Datum	Ekvivalentní množství energie ve vyrobeném vodíku (Wh)	účinnost elektrolyzy (%)	celková účinnost procesu (%)
25. 09. 2015	279	28,0	18,5
27. 09. 2015	327	28,7	18,9
29. 09. 2015	1104	31,6	20,8
02. 10. 2015	1289	31,8	21,0

Z tabulky 15 je zřejmé, že systém výroby vodíku nedosahuje účinnosti vyšší než 21 %. S dalším využitím vodíku (například v palivových článcích) by tato účinnost klesla ještě minimálně o další jednotky procent. Takto nízká účinnost není běžná, ale je způsobena vlastnostmi zařízení, které jsou rozebrány v další kapitole.

Obrázek 28 graficky znázorňuje průběh výkonu v systému ze dne 29. 9. 2015. Zelená část grafu znázorňuje energii z fotovoltaických panelů, kterou není možné zpracovat elektrolyzérem. Tato energie je tedy ukládána do olověných akumulátorů. Modrý průběh vyobrazuje energii z FV panelů bezprostředně spotřebovanou elektrolyzérem, ve které jsou započteny účinnosti předřazených elektronických periférií, tedy AC/DC a DC/DC měničů. Je evidentní, že v okamžiku poklesu okamžitého výkonu na fotovoltaických panelech, by za normálních okolností nutně muselo dojít k vypnutí elektrolyzéru. Díky akumulované energii v olověných akumulátorech je však tento problém vyřešen a červená část grafu vyobrazuje právě ten čas, kdy je spotřeba elektrické energie elektrolyzéru hrazena z akumulátorů. Díky tomuto řešení by teoreticky mohl elektrolyzér vyrábět vodík po 3x delší dobu, tedy více jak 9 hodin. Průběh energie na elektrolyzéru má velice skokový charakter, což bohužel nelze podložit žádným vyjádřením od výrobce elektrolyzéru. Podle úvah jde však o přerušovaný chod kompresoru, který udržuje tlak na výstupu v mezích, díky kterým může vodík postupovat směrem k tlakovým lahvím.



Obrázek 28 - Teoretický průběh výkonu v systému ze dne 29. 9. 2015

#### **4.4.5. Návrh na zlepšení účinnosti systému**

Z výsledků měření a následných výpočtů je patrné, že účinnost nedosahuje příliš dobrých výsledků. Tato kapitola se tedy zabývá analýzou použité technologie a následně návrhem na její zlepšení. Všechna uvedená vylepšení nejsou hodnocena po ekonomické stránce, kterou by v případě jejich realizace bylo nutno zvážit.

##### **Fotovoltaické panely**

Panely Schott Poly 165 dosahují dle technické specifikace účinnosti 12,6 %. Monokrystalické FV panely se v současnosti pohybují s účinností mezi 14-20 %. Samotná výměna FV panelů by se ještě dala podpořit jejich umístěním na tzv. „tracker“, jenž by zajistil ideální pozici panelů vůči slunci po celý den (nyní stacionární pozice se sklonem 50°) a zvýšil by výrobu elektrické energie systému až o 30 %.

##### **Olověné akumulátory**

Použité olověné akumulátory s účinností kolem 80 % jsou v současnosti překonány technologií Li-Ion baterií. Ty jsou schopny dosahovat účinnosti až 95 %, vyšší životnosti a nabídnou také vyšší energetickou hustotu.

##### **AC/DC měnič**

Střídač Sunny Island 4282, který je použit v tomto systému, nepracuje při svém jmenovitém výkonu, čímž je snížena jeho účinnost, která by za normálních podmínek neměla klesnout pod 90 %. Pro tento systém akumulace elektrické energie do vodíku by postačil střídač menšího výkonu.

##### **DC/DC měnič**

Tento měnič při měření dosahoval deklarované účinnosti 97 %, není jej tedy třeba měnit.

##### **Elektrolyzér**

Samotný elektrolyzér, který byl při měření použit, není příliš vhodný pro použití v tomto systému. Čistota vodíku na výstupu dosahuje 99,9999 %, což je hodnota, která je spíše vyžadována pro diagnostické účely. Vodík, který je produkován v laboratoři, je primárně využíván jako palivo pro palivové články, které vyžadují čistotu 99,99 %, tedy o dva řády nižší. Pro provozování tohoto systému by bylo tedy nasnadě zvolit vhodnější elektrolyzér.

## 5. Zhodnocení

S čím dál větším využitím obnovitelných zdrojů elektrické energie bude mít v budoucnu její akumulace stále větší význam, a to nejen v silnoproudé elektroenergetice, ale také v automobilovém průmyslu, či jiných technických odvětvích. V současné době se pro akumulaci většího množství el. energie jeví jako nejlepší řešení stále přečerpávací vodní elektrárny, které však provází zásadní nevýhody, které souvisí s jejich samotnou výstavbou. Dnešní technologie umožňují akumulaci elektrické energie decentralizovaně, například v alkalických bateriích, jejichž cena soustavně klesá, a zároveň se zlepšují samotné technické parametry.

Akumulace elektrické energie do vodíku skýtá velký potenciál, jelikož existuje mnoho způsobů, jak vyrobený vodík využít. V přímé přeměně vodíku na elektrickou energii pomocí palivového článku zatím svou cenou vodíková technologie není schopna konkurovat výše zmíněným alkalickým bateriím (např. Li-Ion). Aktuálně mnohem zajímavější sféra využití se nabízí výroba tepla, přímým spalováním vodíku. Jedná se o technologický trend, který se nazývá „Power To Gas“ a v současnosti je například v sousedním Německu v plánu mít v roce 2022 vybudovány kapacity výroby vodíku z elektřiny o celkovém příkonu 1000 MW. Dalším cílem je snížit investiční náklady na pořízení technologie pod 500 EUR/kW (elektřiny).[18]

Závěrem lze říci, že efektivita technologie pro akumulaci elektrické energie stoupá spolu s vyšší efektivitou získávání energie z obnovitelných zdrojů. Tato provázanost nedovolí omezení již relativně levných obnovitelných zdrojů elektrické energie, které naopak v budoucnu umožní realizaci akumulace energie z OZ ve větším měřítku.



## 6. Závěr

V této práci byly rozebrány různé druhy akumulčních systémů, část byla srovnána pomocí multikriteriální analýzy TOPSIS a podrobněji zde byla prakticky řešena akumulace elektrické energie z fotovoltaických panelů do vodíku.

Analýzou TOPSIS zde byla srovnána akumulace elektrické energie do lithium-iontových baterií, superkapacitorů, setrvačnicku a vodíkové technologie. Váhy kritérií byly voleny s přihlédnutím k reálnému využití akumulčního systému, tedy akumulaci v ostrovním systému z fotovoltaických panelů v tzv. hybridním systému. Mezi kritéria, kterým byla přisouzena největší váha a která tedy nejvíce ovlivňovala výsledky, patří pořizovací náklady a životnost systému. Vzhledem, k tomu, že lithium-iontové baterie dosahují v těchto ohledech výborných parametrů, vyšly z analýzy s 37 % nejlépe a samotnou analýzou byla tedy teoreticky potvrzena technologie, která se v praxi pro tyto systémy používá (akumulátory  $\text{LiFePO}_4$ ). Na druhém místě se umístily s 34,7 % superkapacity, na třetím s 23,5 % setrvačnick. Vodíková technologie, kterou se tato práce převážně zabývá, skončila na posledním místě a to hlavně kvůli pořizovacím nákladům.

Cílem praktické části práce bylo zjistit účinnost výroby vodíku ve vodíkové laboratoři VŠB TU Ostravě. K tomu byla použita naměřená data na FV panelech z vybraných dnů měsíců září a října roku 2015. Po změření příkonu elektrolyzáru a zjištění energetické účinnosti celé soustavy byly tyto poznatky aplikovány na naměřená data na FV panelech a teoreticky zpracovány dohromady. Touto operací bylo zjištěno, že zakomponováním olověných baterií do systému by byl ve slunečně nadprůměrných dnech prodloužen chod elektrolyzáru až o trojnásobek, což se projevilo také do celkového množství vyrobeného vodíku. U slunečně podprůměrných dnů by bez olověných akumulátorů ke startu elektrolyzáru vůbec nedošlo.

Účinnost elektrolyzáru a celé soustavy dosahovala hodnoty kolem 20 %. Bylo to způsobeno účinností baterií, měničů AC/DC a DC/DC, ale hlavně samotného elektrolyzáru, který se právě na úkor účinnosti vyznačuje velmi vysokou čistotou vodíku na výstupu 99,9999 %, která je k účelům skladování vodíku pro energetické účely zbytečně vysoká. Nejvyšší nárok na čistotu vodíku mají palivové články, ta však dosahuje hodnoty o dva řády nižší, a sice 99,99 %.

Praktické využití zvoleného postupu akumulace elektrické energie ve spolupráci s elektrochemickou akumulací může najít využití především ve sféře dlouhodobé akumulace elektrické energie do vodíkových zásobníků.

## **Použitá literatura:**

- [1] Hradílek, Z. – Moldřík, P.: Akumulace el. Energie získané z obnovitelných zdrojů. Časopis Energetika č. 4, 2010, s. 228
- [2] Portužák, R.: Přečerpávací vodní elektrárny. Prezentace VŠB
- [3] Ney, M.: Akumulace elektrické energie získané z obnovitelných zdrojů. Disertační seminář, 2014
- [4] Kratochvíl, T.: Akumulace elektrické energie získané z obnovitelných zdrojů. Bakalářská práce, 2010
- [5] Bouchalová, A.: Elektrický proud v kapalinách. Soubor prezentací. CZ.1.07/1.1.24/01.0114
- [6] Porš, Z.: Palivové články. Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s. 2002
- [7] Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení. VŠB – TU Ostrava, 2008. ISBN 978-80-7225-291-6
- [8] Vaculík, J.: Výzkum akumulace elektrické energie získané z obnovitelných zdrojů. Doktorská disertační práce, 2015
- [9] Kousksou T. – Bruel P. – Jamil. A – El Rhafiki T. – Zeraouli Y.: Solar Energy Materials & Solar Cells. Magazine Elsevier volume 120, Part A, January 2014, Pages 59–80
- [10] Jílek, P.: Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie. Diplomová práce, 2013
- [11] Vilhelm, O.: Kompozitní elektrodové materiály pro lithium-iontové akumulátory na bázi LiFePO<sub>4</sub>. Diplomová práce, 2012
- [12] Burešová, L.: Systém pro efektivní elektrolýzu vody. Dilomová práce, 2014

## Webové zdroje:

- [13] *Ni-Cd akumulátor – Princip* [online]. [cit. 12.12.2015].  
<http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nicd-akumulatory/princip>
- [14] *Ukládání elektřiny z fotovoltaických a větrných elektráren* [online]. [cit. 22.4.2016].  
<http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/ukladani-elektřiny-z-fotovoltaických-a-větrných-elektřaren.aspx>
- [15] Vojáček, Antonín, 2006. *Superkondenzátor - princip, vlastnosti, použití* [online]. [cit. 11.12.2015]. <http://automatizace.hw.cz/clanek/2006122601>
- [16] *Elektrolýza vody – elektrolyzér a palivový článěk* [online]. [cit. 24.4.2016].  
[http://homen.vsb.cz/~vec05/PI/LabPI/navody/07-Elyza\\_vody.pdf](http://homen.vsb.cz/~vec05/PI/LabPI/navody/07-Elyza_vody.pdf)
- [17] *Secondary Batteries (Rechargeable Batteries): Lithium Ion Batteries* [online]. [cit. 12.12.2015]. <https://eu.industrial.panasonic.com/products/batteries-energyproducts/secondary-batteries-rechargeable-batteries/lithium-ion-batteries>
- [18] Schindler, Jan, 2.4.2016. *Zachrání technologie Power to Gas obnovitelné zdroje?* [online]. [cit. 27.4.2016]. <http://oze.tzb-info.cz/11034-zachrani-technologie-power-to-gas-obnovitelne-zdroje>

## Seznam Tabulek:

Tabulka 1 - Matice párových porovnání.....	21
Tabulka 2 - Výsledné váhy jednotlivých kritérií .....	22
Tabulka 3 - Přehled variant s hodnotami jednotlivých kritérií [9] .....	23
Tabulka 4 - Normalizovaná matice.....	23
Tabulka 5 - Vážená kritériální matice .....	24
Tabulka 6 - Ideální a bazální varianta.....	24
Tabulka 7 - Vzdálenosti jednotlivých variant od ideální varianty.....	24
Tabulka 8 - Výpočet relativních ukazatelů vzdáleností.....	24
Tabulka 9 - Technické parametry elektrolyzéru HOGEN GC 600 [8].....	28
Tabulka 10 - Výkon z FV panelů ze dne 25. a 27. září 2015 .....	31
Tabulka 11 - Výkon z FV panelů ze dne 25. a 27. září 2015 .....	32
Tabulka 12 - Hodnoty tlaku, teploty a množství vodíku v průběhu výroby.....	34
Tabulka 13 - celková spotřeba přípravné a měřicí fáze .....	36
Tabulka 14 – Teoretické výsledky akumulace el. energie do vodíku.....	38
Tabulka 15 - Energetická bilance systému .....	39

## Seznam Obrázků:

Obrázek 1 – Přecherpací vodní elektrárna [3] .....	4
Obrázek 2 - Princip systému CAES [3] .....	5
Obrázek 3 - Setrvačník firmy Beacon Power [3].....	6
Obrázek 4 - Supravodivý akumulátor [14] .....	7
Obrázek 5 - Detail svitku superkondenzátoru [15].....	8
Obrázek 6 - Schéma olověného akumulátoru [5] .....	9
Obrázek 7 - Princip průtokové baterie [10] .....	10
Obrázek 8 - Ni-Cd akumulátor [13].....	11
Obrázek 9 - Lithiový akumulátor [17].....	12
Obrázek 10 - Článek NaS [14].....	13
Obrázek 11 - Schéma vodíkového akumulačního systému [1] .....	15
Obrázek 12 - Princip membránového elektrolyzéry [12].....	16
Obrázek 13 - FV panely Schott Poly [8] .....	26
Obrázek 14 - Olověné baterie [8] .....	26
Obrázek 15 - Polovodičové měniče [8] .....	27
Obrázek 16 - Elektrolyzér HOGEN Gc 600 [8] .....	27
Obrázek 17 - Průtokoměr Aalborg XFM17 [8] .....	28
Obrázek 18 - Tlakové láhve [8] .....	28
Obrázek 19 - Průběh výkonu na FV panelech ze dne 25. 9. 2015.....	30
Obrázek 20 - Průběh výkonu na FV panelech ze dne 27. 9. 2015.....	30
Obrázek 21 -Průběh výkonu na FV panelech ze dne 29. 9. 2015.....	31
Obrázek 22 - Průběh výkonu na FV panelech ze dne 2. 10. 2015.....	32
Obrázek 23 - Blokové schéma akumulace do vodíku .....	33
Obrázek 24 - Množství vyrobeného vodíku .....	35
Obrázek 25 - Teplota demineralizované vody v elektrolyzéry.....	35
Obrázek 26 - Průběh příkonu na elektrolyzéry.....	36
Obrázek 27 - Množství vyrobeného vodíku .....	38
Obrázek 28 - Teoretický průběh výkonu v systému ze dne 29. 9. 2015.....	41